

GRADO SUPERIOR:

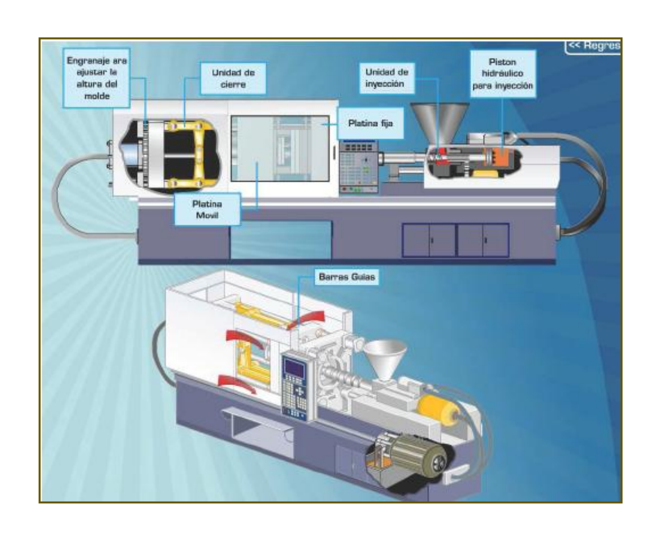
DISEÑO EN FABRICACIÓN MECÁNICA

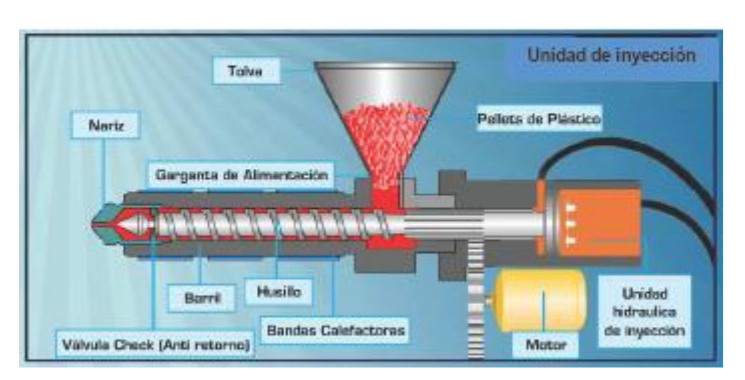
Módulo 5: Diseño de moldes para materiales poliméricos











INDICE



Introducción

La elaboración y transformación de sustancias naturales en los materiales que hoy conocemos como "plásticos" no empezó hasta el siglo XIX, aunque no adquirieron importancia económica hasta los años treinta del pasado siglo, cuando el profesor Hermann Staudinger formuló para ellos su modelo estructural. El químico alemán H. Staudinger (1881 - 1965) recibió en 1953 el premio Nobel por estas investigaciones.

El auge de la industria de los plásticos en todo el mundo no comenzó hasta después de la Segunda Guerra Mundial. En un principio se empleó el carbón como material de partida, hasta que a mediados de los años cincuenta se produjo el cambio hacia el petróleo. La ventaja de este cambio radicaba en que los subproductos obtenidos en el refinado por "cracking" (to crack = romper) del petróleo podían, por vez primera, ser aprovechados de una manera eficiente. La crisis del petróleo en 1973 frenó un poco el fuerte crecimiento de la producción de plásticos. A pesar de ello, estos materiales continúan presentando ritmos de crecimiento dinámicos, por encima de la media.

El uso de plásticos, no obstante, sólo se consigue de manera óptima cuando se tienen en cuenta sus especiales características. Precisamente cuando se quiere sustituir un material clásico como la madera o el metal es cuando más presentes hay que tener las múltiples posibilidades de los plásticos, diseñando piezas de acuerdo con los principios propios de estos materiales. Deben conocerse los métodos de transformación más adecuados, así como los valores característicos de cada material de construcción.

La aplicación de procedimientos adecuados para plásticos presupone un conocimiento fundamental de los métodos de fabricación y transformación, así como del comportamiento del material concreto. A través de esta evaluación se pretende dar una visión de conjunto sobre el tema de los plásticos.

Los plásticos, parte de nuestra vida cotidiana.

El uso diario ha acabado por imponer los plásticos como algo totalmente natural. Cuando empleamos bolsas para congelados o utilizamos cubos de plástico no solemos preocuparnos de porqué estos objetos se han fabricado con plásticos.



¿Por qué se fabrican cubos con plástico y no de madera o de chapa, como antes?

El peso es el factor decisivo en este caso. El cubo de plástico, más ligero, es suficientemente estable como para permitir el transporte de agua. ¿Para qué, entonces, cargar con un cubo de chapa, mucho más pesado?

¿Por qué se recubren de plástico los cables eléctricos y no con porcelana o tal vez con tejidos textiles?

El recubrimiento plástico de cables es más flexible que la porcelana y más resistente que el tejido textil, y a la vez aísla el cable de igual o incluso de mejor forma.

¿Por qué se revisten con plásticos los interiores de los frigoríficos?

Por un lado, porque el plástico les confiere resistencia y por otro, porque los plásticos conducen tan mal el calor que permiten conservar por más tiempo las bajas temperaturas.



¿Por qué los compact disc se fabrican en plástico?



Porque el plástico denominado policarbonato es tan transparente como el cristal y, al mismo tiempo, es más ligero y no tan frágil como éste.

Hay que añadir a todos los ejemplos el argumento del precio. El empleo de plásticos es, en especial en la producción en masa de artículos, la solución técnicamente más económica.

Los plásticos materiales versátiles.

Antes de conocerse los plásticos, la naturaleza era la única fuente de materiales ligeros. La madera puede trabajarse fácilmente, es sólida y flexible y puede dársele una forma estable, con ayuda de determinados procesos. El caucho natural, materia prima de la goma, es elástico y extensible.

Pero las propiedades de las sustancias naturales no bastaban para solucionar todos los problemas. Por ello se empezaron a buscar sustancias que suplieran justamente esas carencias. Los químicos fueron capaces, a comienzos de este siglo, de elucidar hasta tal punto la estructura molecular de sustancias naturales como, por ejemplo, el caucho, que fue posible comenzar su producción por medios sintéticos.

Los plásticos que se producen hoy en día son, en muchos aspectos, muy superiores en propiedades a las sustancias naturales. En la actualidad se dispone de materiales capaces de ofrecer propiedades cuyo perfil se ajuste de forma ideal a aplicaciones con fines enormemente distintos.

No puede juzgarse por su mero aspecto cuál es la aplicación ideal para una pieza de plástico. Para ello, debemos conocer algo de su estructura interna. Ahí intervienen las propiedades llamadas específicas de cada material, como la densidad, la conductividad, la transparencia, o la solubilidad.

¿Qué son los plásticos?

La palabra "plástico" no se asocia únicamente a un material. Tal y como sucede con "metal", que designa otros materiales aparte del hierro y del aluminio, la palabra "plástico" debe entenderse como un término general que describe una gran variedad de sustancias, las cuales se distinguen entre sí por su estructura, propiedades y composición.

A pesar de todo, todos los plásticos tienen algo en común. Se originan a través del entrecruzamiento o encadenamiento de moléculas muy largas, denominadas macromoléculas (macro = grande). A menudo estas macromoléculas constan de más de 1.000 unidades estructurales una detrás de otra, como las perlas de un collar. Podemos imaginarnos un plástico como una especie de ovillo de lana, formado por muchos hilos individuales. Sacar un solo hilo de este ovillo puede resultar muy difícil. Lo mismo sucede con los plásticos, en los que unas macromoléculas retienen o sujetan a las otras. Como las macromoléculas, y por tanto los plásticos, están formadas por multitud de unidades estructurales sencillas, llamadas monómeros (mono = uno, meros = parte), en general reciben también el nombre de polímeros (poli = muchos).



Materias primas.

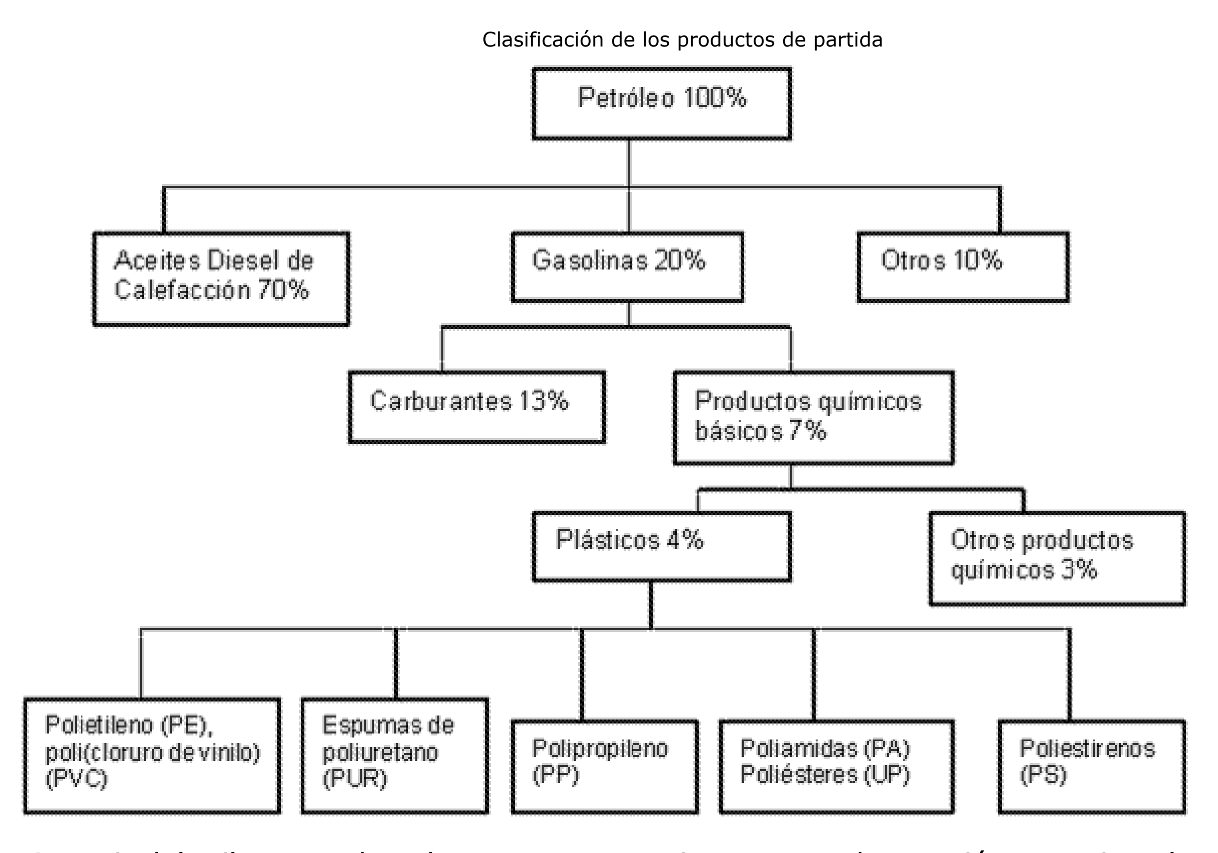
Las materias primas para la fabricación de plásticos son sustancias naturales, como la celulosa, el carbón, el petróleo y el gas natural. Las moléculas de estas sustancias tienen en común el hecho de contener carbono (C) e hidrógeno (H). También pueden estar presentes el oxígeno (0), el nitrógeno (N) o el azufre (S). La más importante de las materias primas aludidas es el petróleo.

En el siguiente esquema se ha indicado qué proporción representan los distintos productos que se obtienen a partir del petróleo con respecto a la producción total del mismo. Queda reflejado claramente el hecho de que sólo un cuatro por ciento del petróleo es transformado en plásticos.

Directamente a partir del petróleo no se pueden fabricar plásticos.Son necesarios diversos pasos intermedios.

En una refinería el petróleo se escinde por destilación (proceso para separar líquidos) en sus diversos componentes. Para ello se saca partido de los diferentes puntos de ebullición de estos componentes. Se separan, entre otros: gas, gasolinas, éter de petróleo, gasoil, y como residuo de destilación queda el alquitrán, que se utiliza en la construcción de carreteras.

El producto de destilado más importante para la fabricación de plásticos es la gasolina. Ésta, una vez destilada, es tratada en un proceso de disociación térmica, en el que es escindido en etileno, propileno, butileno y otros hidrocarburos. Este proceso también se denomina cracking (to crack = romper). Las proporciones de los diferentes productos de disociación pueden regularse mediante la temperatura. Así, por ejemplo, a 850 ºC se obtiene más de un 30 % de etileno.



A partir del etileno pueden obtenerse en sucesivas etapas de reacción, por ejemplo, estireno y cloruro de vinilo. Estas dos sustancias son asimismo sustancias de partida (monómeros), a partir de las cuales pueden obtenerse los plásticos.

Las sustancias de partida de los polímeros se denominan "monómeros". Muchas veces es posible producir diversos polímeros, partiendo de las mismas sustancias, mediante cambios en el proceso de producción o a través de mezclas entre ellas.



Los antecedentes de los monómeros son principalmente el petróleo y el gas natural. Como para su fabricación sólo es estrictamente necesario el carbono que éstos contienen, en teoría podríamos partir también de la madera, del carbón, o incluso de CO_2 presente en el aire. Esto no se pone en práctica, puesto que su producción a partir de petróleo y gas es más económica.

Algunos monómeros eran hace años los subproductos de la fabricación de gasolinas o aceites de calefacción. El gran consumo de plásticos hace hoy necesaria la producción en las refinerías de estos "subproductos".

Síntesis de Polímeros

Los polímeros no son productos naturales. Los procesos por los que se crean los polímeros se conocen con el nombre de síntesis.



Hay dos tipos de síntesis, por polimerización y por combinación de polímeros.

A continuación se pueden diferenciar los dos tipos de síntesis:

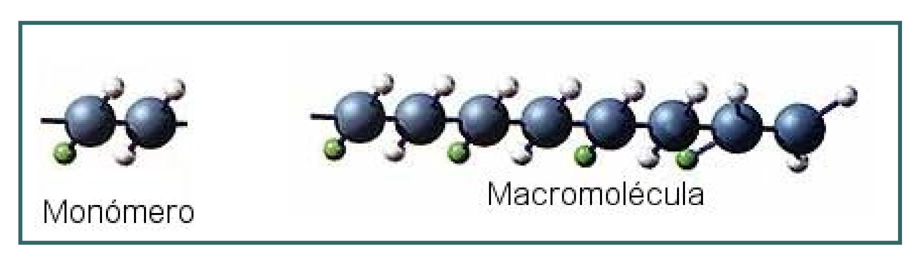
- Polimerización
- Combinación de polímeros



Polimerización

Las sustancias de partida de los plásticos reciben el nombre de monómeros (mono = uno, meros = parte). A partir de ellas pueden sintetizarse las macromoléculas de los plásticos. El concepto macromolécula deriva del tamaño de las moléculas de los plásticos (macro = grande), ya que éstas constan de miles de moléculas de monómeros.

Antes de formarse la macromolécula, se tienen los diferentes monómeros de manera aislada. Hace falta una reacción química para unir las moléculas aisladas en la formación de una macromolécula. Dicha macromolécula se llama polímero (poli = muchos). Y el proceso de formación se denomina polimerización. En el caso más sencillo, las macromoléculas se forman a partir de muchos monómeros iguales, por lo que el resultado final es una sucesión de eslabones que se van repitiendo.



La línea principal, el denominado esqueleto, muy a menudo está formado únicamente por el elemento químico carbono (C). Otras veces aparecen también el oxígeno (O) o el nitrógeno (N). Del esqueleto penden otros elementos o grupos de elementos, como por ejemplo el hidrógeno (H). Si los grupos de elementos están compuestos por eslabones que forman, a su vez, cadenas moleculares, se les llama ramificaciones o cadenas laterales.

La polimerización se puede dar por:

- Adición
- Policondensación

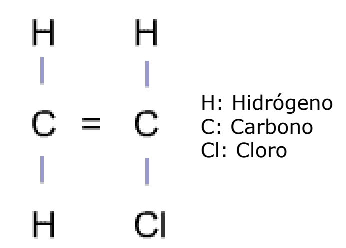


Síntesis de Polímeros

Polimerización Por Adición

En esta polimerización, el doble enlace existente entre los dos átomos de carbono del monómero tiene un papel decisivo. Ilustraremos este hecho con el ejemplo del cloruro de vinilo.

Fórmula estructural del cloruro de vinilo



Cada enlace de la molécula está formado por dos electrones. El doble enlace consta, por lo tanto, de dos enlaces con dos electrones cada uno. En los dobles enlaces resulta relativamente fácil abrir uno de ellos, es decir, separar los dos electrones componentes y dejarlos desapareados.

Esta escisión conduce a la formación de las cadenas moleculares. Empezamos con la escisión del doble enlace por la acción de otra partícula, como por ejemplo, un radical. Los radicales son elementos, o grupos de elementos, altamente reactivos, es decir, que tienden a reaccionar con facilidad con otras moléculas. El motivo de ello es la presencia de un electrón libre sin aparear que busca formar un enlace con otro electrón. La escisión del doble enlace del cloruro de vinilo por un radical (R) se muestra en la imagen.

Escisión del doble enlace

H H H H
R* + C = C ⟶ R − C = C*
H Cl H Cl

R: Cualquier otra molécula

Durante la escisión, el electrón del radical forma un nuevo enlace con uno de los electrones del enlace escindido. El electrón que resta del enlace escindido se halla ahora al otro lado del cloruro de vinilo.

Este lado donde se encuentra el electrón libre puede a su vez escindir un nuevo doble enlace. De esta manera el conjunto crece hasta formar una larga cadena. El final del crecimiento tiene lugar cuando se encuentran dos extremos de una cadena, o bien uno de ellos se une a un radical. Como al principio hay muchos más monómero de cloruro de vinilo que extremos de cadena o radicales, las cadenas llegan a hacerse muy largas antes de detenerse en su crecimiento. Para primeras propiedades del plástico la longitud de la cadena es de gran trascendencia. Esta longitud viene indicada por el número n de elementos repetidos en la cadena. Este número excede por lo general las 10.000 unidades.

[H H
— C — C —
H Cl]n

Unidad de repetición

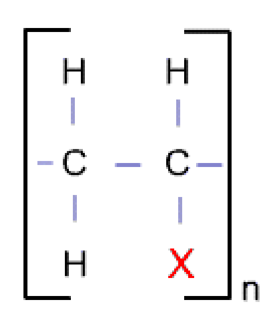
Para tener una idea de cuán larga puede ser una macromolécula, si aumentáramos su tamaño en un millón de veces, tendría 20 cm de espesor y 1 km de longitud.



En la siguiente tabla se encuentran resumidos algunos de los polímeros que se obtienen por adición y algunas de sus aplicaciones:

Polímero	Producto
Polietileno (PE)	Film de embalaje y de protección, botellas, tuberías, recipientes de transporte, accesorios eléctricos, tapas, tableros, construcción de aparatos químicos.
Poli(metacrilato de metilo) (PMMA)	Acristalamientos, tulipas traseras, piezas sanitarias, rótulos, lentes, instrumentos de dibujo, cúpulas.
Polipropileno (PP)	Carcasas de aparatos, piezas de lavadoras, instalaciones eléctricas, tuberías, tableros, construcción de máquinas.

En general:



Unidad de repetición

Grupo X	Polímero
-H	Polietileno (PE)
$-CH_3$	Polipropileno (PP)
-Cl	Policloruro de vinilo (PVC)
$-COO-CH_3$	Polimetacrilato de metilo (PMMA)
$-C_6H_5$	Poliestireno (PS)
(copolímero)*	Estireno-acrilonitrilo (SAN)
(copolímero)*	Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)

¿Cómo podemos memorizar fácilmente el mecanismo de la polimerización?

Un convoy de vagones de ferrocarril sólo puede formarse cuando cada coche tiene simultáneamente, un anclaje delante y otro detrás. Análogamente, una cadena macromolecular se forma por polimerización mediante el acoplamiento entre sí de las unidades monoméricas gracias a los electrones de los dobles enlaces escindidos.



Síntesis de Polímeros

Policondensación

Lo más típico de las reacciones de policondensación es que durante las misma tiene lugar la pérdida de moléculas de pequeño tamaño, frecuentemente moléculas de agua. Este tipo de pérdida se conoce en química orgánica como condensación, de donde deriva el nombre de este procedimiento de obtención de plástico. El agua tiene la fórmula química H_20. La molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno (H) y un átomo de oxígeno (0).

Para la formación de macromoléculas por medio de la reacción de policondensación es necesario el concurso de moléculas que posean dos o más de los llamados "grupos funcionales".

Grupos funcionales:

Grupo carboxilo — C(=O)OH

Grupo amino — N(H)H

Grupo carbonilo — C(=O) —

Grupo hidroxilo — OH

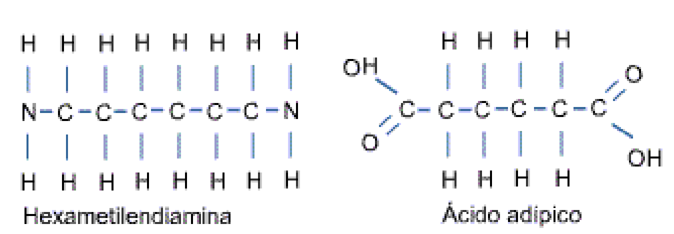
La formación del enlace entre dos moléculas tiene lugar sólo cuando existen dos grupos funcionales distintos que reaccionan perdiendo partes de sí mismos, que se "condensan" en forma de agua.

Por lo tanto, para que la reacción origine una cadena continua durante la policondensación, debemos tener los siguientes tipos de moléculas:

o bien un solo tipo de moléculas que posean al menos dos grupos funcionales distintos, o bien dos tipos distintos de moléculas, como mínimo, que posean dos o más grupos funcionales iguales.

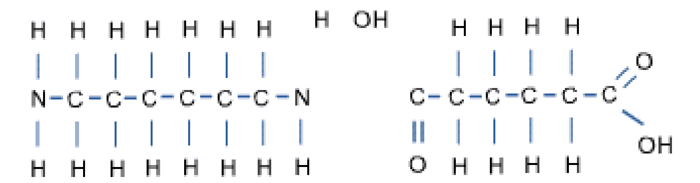
Un ejemplo de policondensación es la reacción en la que a partir de dos moléculas se forma una amida. El plástico formado por muchas de estas moléculas se llama poliamida. La reacción de policondensación de la hexametilendiamina y el ácido adípico conduce a la poliamida 66.

Fórmulas extructurales:



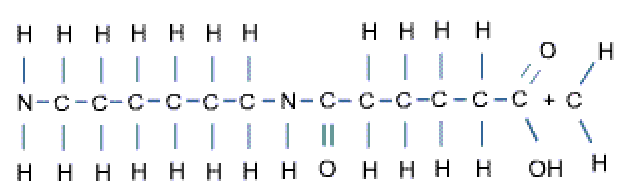
La reacción transcurre en dos etapas:

Disociación de grupos de átomos de los grupos funcionales:



▶ **1ª etapa:** en primer lugar se produce la disociación de grupos de átomos de los grupos funcionales.

Unidad de poliamida y agua:



▶ **2ª etapa:** en segundo lugar se produce la formación de agua y de la macromolécula de poliamida.



Especialmente importante para la policondensación es el hecho de que se trata de una reacción reversible, y que se encuentra dominada por un proceso de equilibrio químico. Por ello durante la reacción las moléculas condensadas, en este caso el agua, deben ser eliminadas constantemente, para que la reacción continúe y puedan formarse cadenas muy largas. No existe en este caso un fin definitivo del proceso, como en la polimerización por adición.

$$HOOC\text{-}(CH_2)_6\text{-}COOH + HO\text{-}(CH_2)_4\text{-}OH \rightleftharpoons HOOC\text{-}(CH_2)_6\text{-}COO\text{-}(CH_2)_4\text{-}OH + H_20$$

Los plásticos que se forman por policondensación reciben el nombre de policondensados, en la siguiente tabla se resumen algunos de ellos y sus aplicaciones:

Policondensado	Producto
Resinas fenol-formaldehído (PF)	Varillas de palancas de cambio, piezas de interruptores, ceniceros de automóvil, calderos, planchas, ollas y sartenes, así como portalámparas.
Poliésteres insaturados (UP)	Reforzados con fibras de vidrio se emplean en construcción de barcos, de automóviles, carcasas de máquinas.
Poliamidas (PA)	Ruedas dentadas, cojinetes, carcasas de aparatos eléctricos, tacos.
Policarbonato (PC)	Carcasas para aparatos domésticos y de oficina, visores, CD, carcasas de cámaras, luces señalizadoras.
Polióxido de fenileno (PPO)	Tapacubos, tapas del depósito de gasolina.
Polibutilen tereftalato (PBT)	Conectores y enchufes eléctricos.
Polietilen tereftalato (PET)	Botellas para agua y bebidas gaseosas.

¿Cómo podemos recordar más fácilmente el funcionamiento de la policondensación?

Durante la policondensación se produce la separación de agua.



Combinación de Polímeros

Combinar diversos plásticos tiene por fin la modificación de las propiedades de los materiales básicos en una dirección determinada, por ejemplo aumentar la resistencia al impacto.



En la mayoría de los casos, las combinaciones de termoplásticos que se intentan responden a los esquemas siguientes.

La combinación de polímeros se puede dar de las siguientes formas:

- Copolimerización
- Mezclado de diversos plásticos ya terminados



Síntesis de Polímeros

Copolimerización

Para la obtención de un plástico por polimerización pueden emplearse a la vez uno o más tipos de monómeros. Si sólo se emplea un solo tipo de monómero se obtiene un homopolímero. Si se fabrica el polímero a partir de dos o más monómeros distintos, se habla de copolimerización (co = con, juntos) y el resultado final es un copolímero. La disposición de las diferentes unidades monoméricas en el copolímero puede ser variable. Mediante la selección de los monómeros podemos influenciar las propiedades finales del plástico. Para conseguir una plastificación interna se incluyen eslabones "elásticos" en las cadenas, por ejemplo mediante copolimerización, y estos eslabones actúan entonces como "articulaciones elásticas", mejorando concretamente la resistencia al impacto, por ejemplo S / B como copolímero.

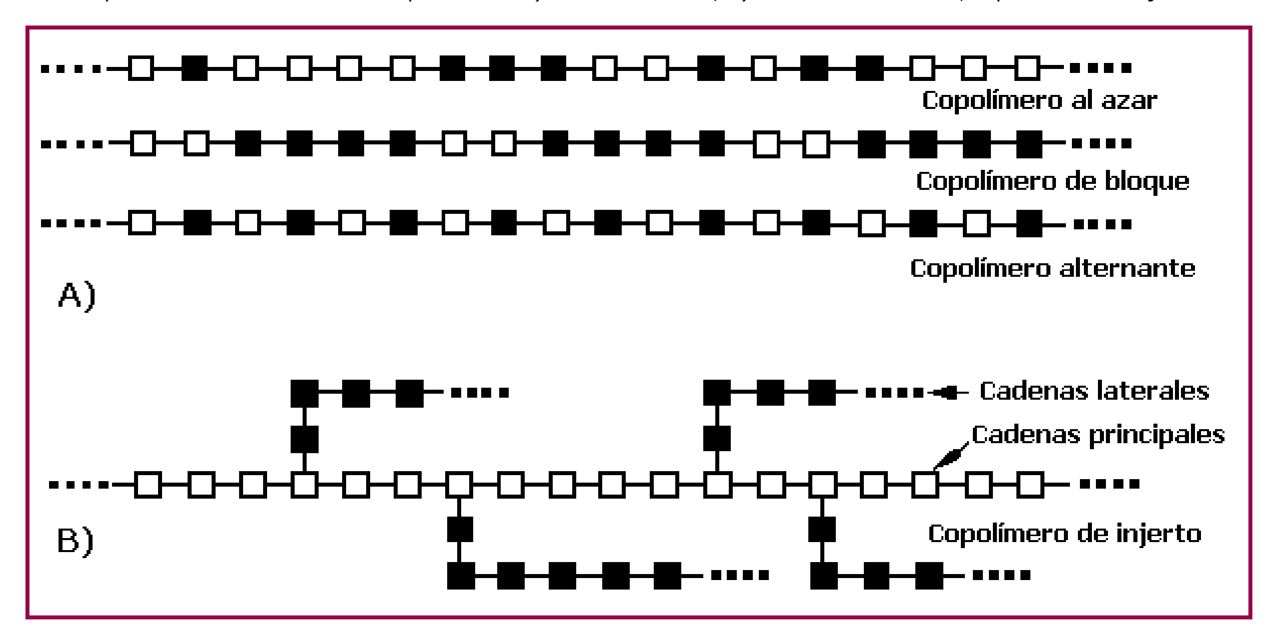
Tipos de copolímeros:

- **Copolímeros al azar:** Es aquella en la que se deja polimerizar libremente a los monómeros sin imponer restricciones a su crecimiento, con lo que se obtiene una sucesión de monómeros sin ningún tipo de orden.

- **Copolímero alternante:** Cuando las unidades monoméricas se van alternando.

- **Copolímeros de bloque:** Cuando las unidades monómericas se van ordenando por bloques más o menos cortos que se van alternando. El caso extremo sería aquel en el que en cada extremo se encuentra un tipo de bloque.

Esquemas estructurales de los copolímeros: A) cadenas lineales, B) cadenas ramificadas, copolímeros de injerto.



- **Copolímeros de injerto:** Es un copolímero ramificado en el que la cadena principal, está constituida por una unidad monómerica y las cadenas laterales por otra diferente.



Mezclado de diversos tipos de Plásticos

Con estas mezclas se fabrican las denominadas aleaciones de polímeros ("blends", "alloys"). Las mezclas o aleaciones más importantes son: (PA + ABS), (PP + EPDM), (PBT + PC). Las mezclas se realizan en busca de una combinación óptima de propiedades.



Para modificar el PS se incorporan al seno del termoplástico ("matríz") partículas finamente divididas de un elastómero, por ejemplo de SB. El resultado es una aleación. Un caso aparte lo constituye la plastificación del PVC (PVC - P). Las moléculas del plastificante se introducen en el interior del plástico a temperaturas elevadas, se sitúan entre las cadenas moleculares y confieren al plástico un comportamiento "elástico como el de la goma".

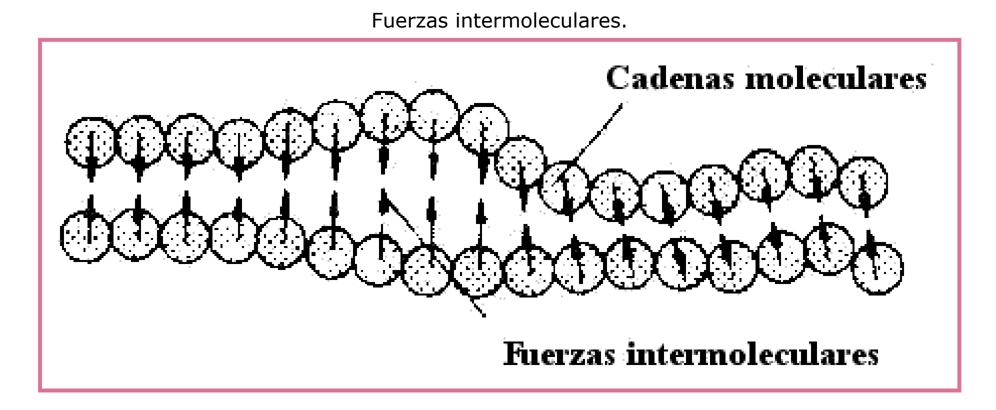
Estos plásticos plastificados pueden ceder al entorno su plastificante por exudación o migración del plastificante, después de lo cual se vuelven quebradizos otra vez. Por lo general estos plásticos plastificados no se utilizan en el sector alimentario.



Fuerzas de Enlace

Los átomos de las moléculas de monómero, de las que se compone un polímero, están unidos mediante enlaces atómicos, llamados también covalentes. No sólo existen fuerzas dentro de las moléculas, sino también entre moléculas vecinas. Dichas fuerzas se denominan intermoleculares y tienen por efecto el que dos moléculas se atraigan con una determinada intensidad y no puedan separarse una de otra. Estas fuerzas proporcionan en gran medida al plástico su resistencia, puesto que las moléculas mantienen su cohesión gracias a ellas y no resbalan fácilmente unas encima de otras.

Fuerzas intermoleculares.



Las fuerzas intermoleculares son, no obstante, más débiles que los enlace covalentes. Cuando se produce una carga, los enlaces entre moléculas son lo primeros en ceder a su efecto.

Influencia de la temperatura.

El calor influye en el movimiento de las moléculas. Cuanto más elevada es la temperatura, más se mueven las moléculas. A causa de este movimiento, las fuerzas intermoleculares disminuyen. A partir de una temperatura determinada llegan a desaparecer, y las moléculas que antes sujetaban pueden moverse libremente. Si desciende la temperatura otra vez, el movimiento de las moléculas vuelve a aminorar y las fuerzas hacen de nuevo su aparición.

Los enlaces entre átomos de una molécula no pueden abrirse por agitación molecular. Son mucho más resistentes y requieren de temperaturas muy superiores para su destrucción. A diferencia de los enlaces intermoleculares, éstos no vuelven a formarse cuando la temperatura desciende. La molécula permanece destruida.

Otra consecuencia del movimiento creciente de una molécula es que, por causa de este movimiento, necesita de más espacio. El plástico se dilata con la temperatura. Este cambio de volumen asociado a un cambio de temperatura, denominado dilatación térmica, toma valores distintos para los diferentes plásticos. Una medida de la variación de longitud es el coeficiente de dilatación térmica lineal. Cuanto mayor es, más se dilata el material por la acción del calor:

Material	Coeficiente de dilatación térmica lineal (α [l / K x 10^{-6}] a 5O °C).
Polietileno (PE)	150 - 200
Policarbonato (PC)	60 - 70
Acero	2 - 17
Aluminio (Al)	23



Denominación de los Plásticos

Según la norma DIN 7728, los plásticos se nombran mediante series de signos (abreviaturas), que permiten adivinar su composición química. Por medio de letras adicionales (códigos) se indica su empleo, las cargas que contienen y sus propiedades básicas, como la densidad o la viscosidad. A continuación indicamos las siglas más importantes de homopolímeros y productos derivados así como su significado:

CA	Acetato de celulosa	PI	Poliimida
CAB	Acetobutirato de celulosa	PIB	Poliisobutileno
CN	Nitrato de celulosa	PMI	Poli(metacrilimida)
CP	Propionato de celulosa	PMMA	Poli(metacrilato de metilo)
EP	Epoxi	PMP	Poli(4 - metil- 1 - penteno)
MF	Melamina-formaldehído	POM	Poli(óxido de metileno); poliformaldehído; poliacetal
PA	Poliamida (precisa de otros indicativos de diferenciación)	PP	Polipropileno
PAI	Poli(amidaimida)	PPE	Poli(éter de fenileno) [antes: PPO = poli (óxido fenileno)]
PAN	Poli(acrilonitrilo)		
PB	Polibuteno-1	PPS	Poli(sulfuro de fenileno)
PBT	Poli(tereftalato de butileno)	PS	Poliestireno
PC	Policarbonato	PSU	Polisulfona
PCTFE	Poli(clorotrifluoretileno)	PTFE	Poli(tetrafluoretileno)
PDAP	Poli(ftalato de dialilo)	PUR	Poliuretano
PE	Polietileno	PVC	Poli(cloruro de vinilo)
PE-C	Polietileno clorado	PVC-C	Poli(cloruro de vinilo) clorado
PEI	Poli(eterimida)	PVI-C	Poli(cloruro de vinilideno)
PEK	Poli(etercetona)	PVDF	Poli(fluoruro de vinilideno)
PEEK	Poli(eteretercetona)	PVF	Poli(fluoruro de vinilo)
PES	Poli(etersulfona)	SI	Silicona
PET	Poli(tereftalato de etileno)	UF	Urea-formaldehído
PF	Fenol-formaldehído	UP	Poliéster insaturado

A las siglas precedentes se les añade otras letras que indican peculiaridades, por ejemplo

Letra	Propiedad indicada	Letra	Propiedad indicada
C	clorado	N	normal, novolaca
D	densidad	P	plastificado
E	espumado, espumable	R	mayor, resol
F	flexible, líquido	U	ultra, sin plastificantes
H	alto	V	muy
I	resistente al impacto	W	peso
L	Lineal, bajo	X	reticulado, reticulable
M	masa, medio, molecular		



Clasificación de los Plásticos

La clasificación de los plásticos se puede hacer, teniendo en cuenta los siguientes aspectos, la estructura interna o según su polaridad.



A continuación veremos las características de estas clasificaciones:

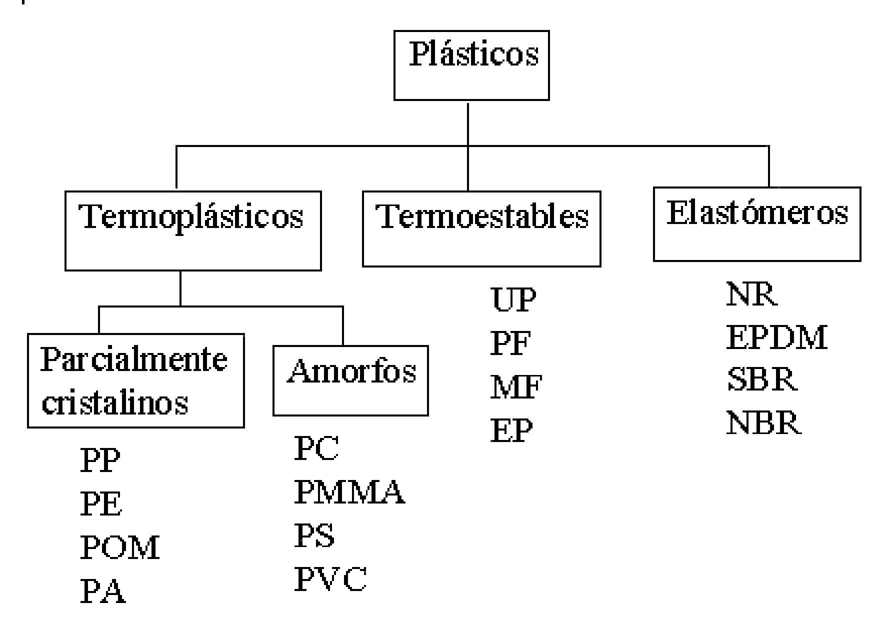
- Según Estructura Interna
- Según Polaridad

Clasificación de los Plásticos

Según Estructura Interna

Los plásticos se clasifican según la estructura de las macromoléculas y según el tipo de mecanismo de enlace entre grandes grupos de materiales plásticos.

Clasificación de los plásticos:



Teniendo en cuenta la estructura interna se pueden clasificar en termoplásticos y en plásticos reticulados.

- Termoplásticos
- Plásticos reticulados



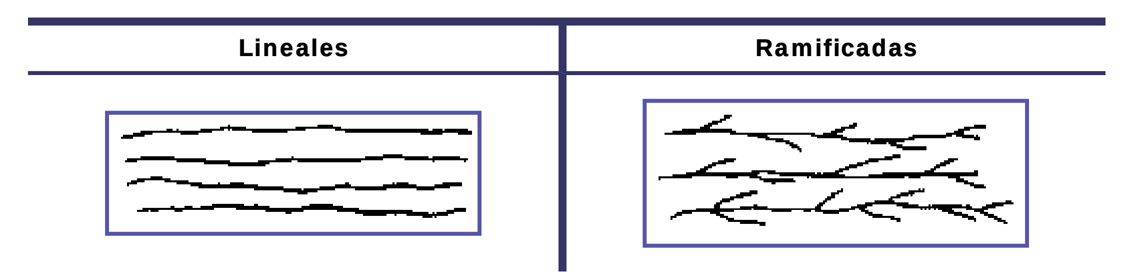
Clasificación de los Plásticos

Termoplásticos

Los termoplásticos (thermos = caliente; plasso = formar) son fundibles (pueden fundirse repetidas veces) y solubles, o como mínimo se hinchan, al contacto con muchos disolventes. Son plásticos cuyas macromóleculas constan de cadenas lineales o ramificadas, que mantienen su cohesión mediante fuerzas intermoleculares. A temperatura ambiente pueden ser desde blandos hasta duros y frágiles, pasando por los duros y tenaces.

Cadenas lineales y ramificadas

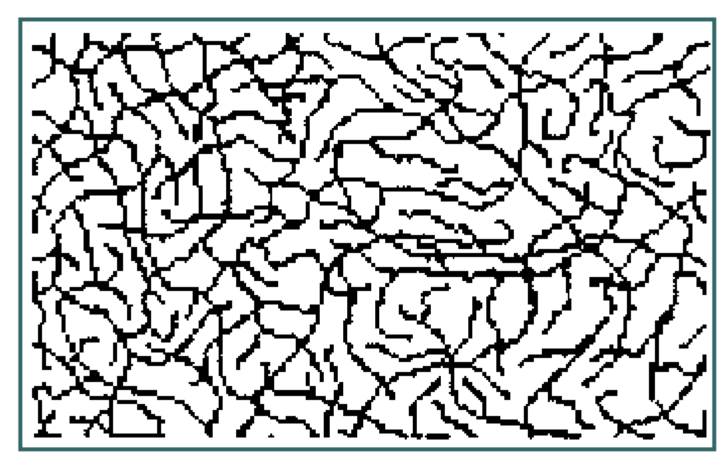
Cadenas moleculares



Termoplásticos amorfos

Entre los termoplásticos distinguimos los amorfos (amorfo = desordenado), transparentes, cuyo estado de ordenación molecular les asemeja al vidrio.

Los plásticos cuyas cadenas moleculares están fuertemente ramificadas, con cadenas laterales largas, no pueden, por causa de su construcción irregular adoptar un estado de empaquetamiento compacto, ni tan siquiera en alguna de sus partes. Tales cadenas moleculares se asemejan a un ovillo de hilo, o a un trozo de algodón en el que los filamentos se encuentran entrelazados en todas direcciones. El plástico carece entonces de todo orden estructural y por ello se denomina termoplástico amorfo.



Estructura de termoplástico amorfo

Debido a que los termoplásticos amorfos son transparentes en estado natural, no coloreado, reciben frecuentemente el nombre de cristales sintéticos u orgánicos.

Termoplásticos semicristalinos



Si las macromoléculas presentan poca ramificación, es decir, pocas y cortas cadenas laterales, entonces es posible que determinadas regiones de las cadenas moleculares se ordenen y dispongan en forma compacta unas al lado de otras. Estas regiones con elevado grado de ordenación dentro de la molécula se denominan regiones cristalinas. Hay que tener en cuenta, no obstante, que nunca se produce una cristalización perfecta o completa, ya que la longitud de las cadenas lo impide, incluso durante la polimerización, cuando se inicia el entrecruzamiento de unas con otras.



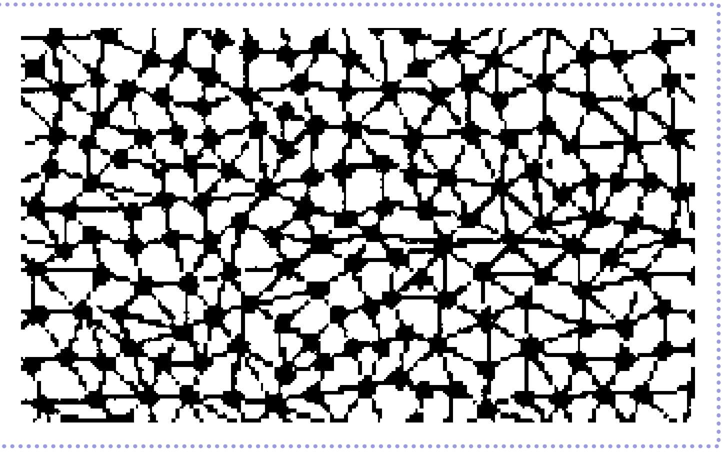
Estructura de termoplástico parcialmente cristalino

Por lo tanto, aparte de las regiones ordenadas, siempre queda desordenada una parte de la molécula, con regiones distantes unas de otras, llamadas regiones amorfas. Los termoplásticos que presentan tanto regiones cristalinas como amorfas reciben el nombre de termoplásticos parcialmente cristalinos.

Los termoplásticos parcialmente cristalinos no son nunca transparentes, ni tan siquiera cuando están en forma natural, no coloreada, sino que, por causa de la dispersión de la luz en las fronteras entre regiones amorfas y cristalinas del plástico, siempre son algo lechosos o de aspecto turbio.

Termoplásticos reticulados o termoestables

A temperatura ambiente estas moléculas altamente reticuladas son muy duras y rígidas, pero al mismo tiempo frágiles (sensibles a los golpes) y, frente a los termoplásticos, tienden a reblandecerse mucho menos por la acción del calor, son infusibles y por lo tanto no son moldeables. Tal y como sucede con los elastómeros, no son fundibles y, en este caso, tampoco hinchables, por causa de la fuerte reticulación. Las tomas de corriente, por ejemplo, se fabrican con termoestables.

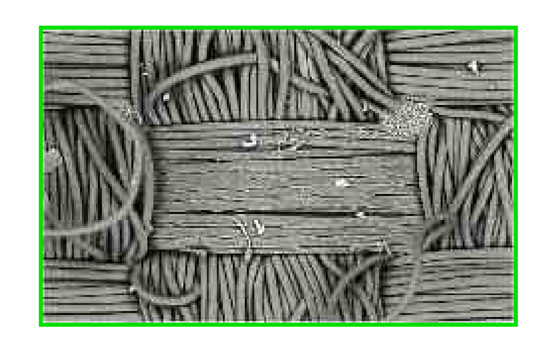


Estructura de polímeros termoestables

Comportamiento de los Plásticos

Las propiedades fundamentales de los plásticos pueden deducirse de su estructura interna. En esta sección vamos a estudiar los siguientes comportamientos de los plásticos:

- Comportamiento general
- Comportamiento térmico
- Comportamiento de amorfos y cristalinos en el procesado





Comportamiento general

Las propiedades fundamentales de los plásticos pueden deducirse de su estructura interna. Los plásticos son, por ejemplo, malos conductores del calor y de la electricidad, es decir, son aislantes porque aparte de los enlaces por pares de electrones no disponen de ningún electrón libre. La densidad de los plásticos es comparativamente más baja que la de otros materiales, debido a que su estructura es relativamente "más suelta". La estabilidad al calor es limitada porque la descomposición o el reblandecimiento de estos materiales se produce a temperaturas más bien bajas. La resistencia química de estos materiales es en general muy buena, es decir, no precisan de protección superficial especial. No obstante, tienen distinta sensibilidad frente a determinados productos químicos, disolventes, radiación UV o radiación energética fuerte. Ello puede producir su envejecimiento (degradación de las macromoléculas) o fisuración por tensión.

Los plásticos termoestables, por su reticulación tridimensional, son duros y quebradizos y requieren normalmente de cargas y materiales de refuerzo. Se suelen teñir con pigmentos para obtener colores opacos.



Los termoplásticos se diferencian claramente en sus propiedades según su constitución amorfa o semicristalina. Los amorfos en general son transparentes y se pueden teñir como tales; los semicristalinos son opacos y lechosos en sus fragmentos cristalinos (en conjunto pueden ser opacos, translúcidos o transparentes) y, por consiguiente, sólo es viable teñirlos de forma cubriente

. El cuadro de propiedades de los termoplásticos amorfos y semicristalinos puede alterarse considerablemente con las cargas y los materiales de refuerzo. Las principales ventajas del uso de los plásticos son:

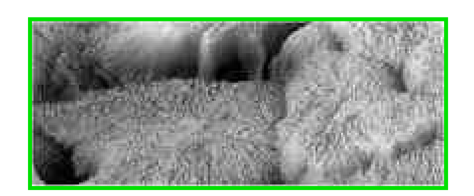
- moldeo fácil a temperaturas relativamente bajas (menores que en el caso de los metales)
- se pueden fabricar formas complicadas a costes reducidos y en una sola operación
- idoneidad para la producción en series largas
- idoneidad para aislantes
- buena atenuación del ruido
- se pueden teñir
- propiedades deslizantes interesantes, incluso sin lubricar



Comportamiento Térmico

Estudiemos la variación de las propiedades mecánicas con respecto a la temperatura. Según si el polímero es amorfo o cristalino el comportamiento térmico varía. Veamos cómo se comporta cada uno de ellos:

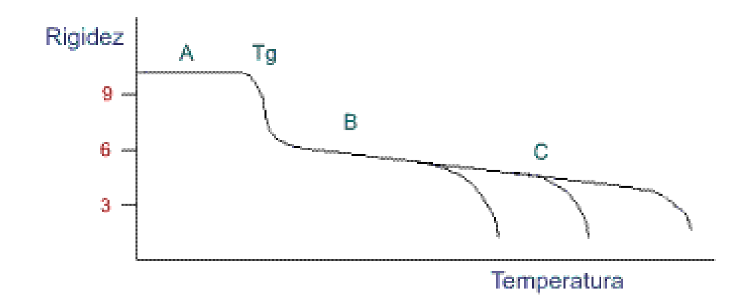
- Termoplásticos amorfos. La temperatura de transición vítrea
- Termoplásticos semicristalinos
- Principales diferencias entre polímeros amorfos y cristalinos





Termoplásticos amorfos

La temperatura de transición vítrea. Se denominan polímeros amorfos a aquellos en los que el 100% de las cadenas están desordenadas, esto es, como fideos en un plato de espagueti. Las cadenas se acercan y se alejan entre sí sin ningún orden relativo. Si representamos la rigidez de un material amorfo frente a la temperatura, obtenemos una curva similar a la que se muestra a continuación:



Zona A. A bajas temperaturas, la rigidez del material es muy alta, debido a que las cadenas no pueden moverse. No hay movilidad molecular, y el material es rígido y frágil.

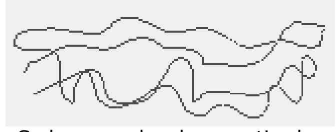
Zona Tg. En esta zona, se produce una pérdida de rigidez muy alta del material, debido a que las cadenas comienzan a poder moverse. Esta temperatura se denomina temperatura de transición vítrea, porque el material deja de ser un sólido vítreo (frágil), para pasar a comportarse de una manera gomosa.

En la Tg, no cambia la ordenación de las moléculas (tanto por encima de la Tg como por debajo podemos representar las moléculas como espaguetis), lo único que sucede es que su movimiento comienza a ser posible.

Zona B. En cuanto se supera la Tg, las cadenas tienen ya movilidad, pero el polímero no es procesable porque su resistencia a fluir es todavía muy alta. El material se comporta como una "goma". Cuando estiramos un trozo de material, las cadenas que lo componen están entrelazadas unas con otras, están enredadas o enmarañadas, y este enmarañado impide que puedan deslizarse las unas con respecto a las otras, esto es, se opone a que el material pueda fluir.

Por otro lado, las cadenas tienen un estado de equilibrio que se llama "ovillo estadístico", y que corresponde al de una cadena totalmente replegada sobre sí misma. Si se estira, aparece una fuerza retráctil, que tiende a devolver la cadena a su estado de equilibrio. Esta fuerza retráctil, junto con el enredado existente entre distintas cadenas, hace que el polímero se comporte como una goma. Es como si tuviéramos varios muelles unidos en serie. En esta zona, la movilidad de las cadenas aumenta con la temperatura, con lo que la capacidad de fluir del polímero aumenta también. Como consecuencia, la resistencia a fluir del material disminuye a medida que lo calentamos.


Ovillo estadístico


Cadenas moleculares estiradas
(orientación durante el proceso de inyección)

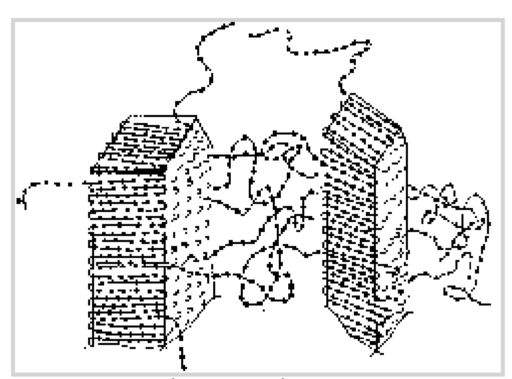


Zona C. En esta zona, la movilidad de las cadenas es ya muy alta, y éstas oponen poca resistencia a deslizarse las unas respecto a las otras, esto es, el material puede ya fluir con relativa facilidad. En estas temperaturas el procesado es ya posible. En general, esta temperatura se suele alcanzar, como mínimo, unos 100 ºC por encima de la Tg. La temperatura a la que el material es procesable, temperatura a la que se inyecta, depende mucho del peso molecular del polímero. Cuando el peso es menor, se alcanza antes, y cuando es mayor, es necesario calentar más el material.

Desde el punto de vista de aplicación, los materiales plásticos amorfos sólo son útiles a temperaturas inferiores a la Tg. Una vez que el material supera la Tg, pierde rigidez, y la pieza puede deformarse sólo por la acción de su propio peso (independientemente de las tensiones residuales.

Termoplásticos Semicristalinos

En el caso de algunos polímeros, se observa que las cadenas son capaces de disponerse de forma ordenada. En concreto, las cadenas se "estiran" y se disponen de forma paralela y ordenada, formando cristales. Estos polímeros suelen ser aquellos que no tienen sustituyentes laterales voluminosos (el grupo X en el caso de los polímeros de adición), de manera que las cadenas pueden acercarse mucho las unas a las otras, ordenarse de manera regular y compacta, y de este modo formar cristales. Estos cristales primarios se denominan lamelas, y sus dimensiones típicas son del orden de 1.000 nm de anchura y 10 nm de espesor.


Representación esquemática de las lamelas.

Sin embargo, las cadenas son muy largas y es muy difícil que se estiren al 100 %, por lo que la cristalinidad de un polímero nunca es completa, y cuando se habla de materiales cristalinos debemos de entender que se trata en realidad de materiales semicristalinos. Además, para que se puedan estirar, deben ser capaces de vencer las fuerzas viscosas y de enmarañamiento, lo que es tanto más difícil cuanto mayor sea el peso molecular del material y su viscosidad. Por ello, materiales muy viscosos como el PVC o el PC, que en principio podrían cristalizar dado que no tienen grupos laterales voluminosos, son poco cristalinos debido a su alta viscosidad.

La lamela que ha comenzado a crecer en el punto de nucleación, puede enroscarse o dividirse en distintas ramas, dando un patrón de crecimiento radial, que se denomina crecimiento cristalino esferulítico. A la red de lamelas formadas a partir de un punto de nucleación se le denomina esferulita. Como se puede apreciar en la figura, cada esferulita está compuesta por tanto de material amorfo y cristalino.

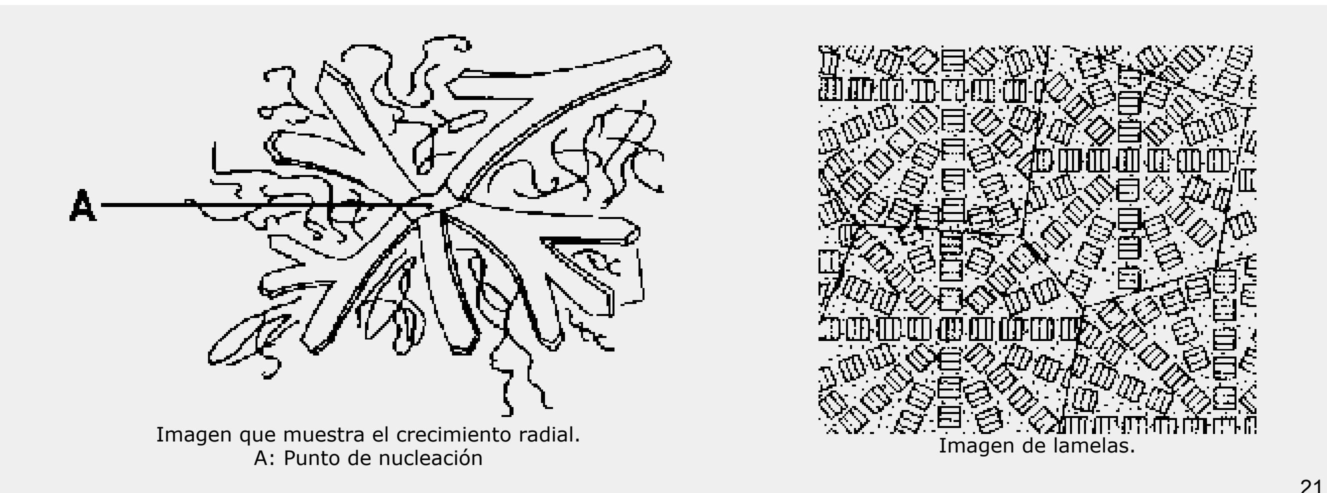
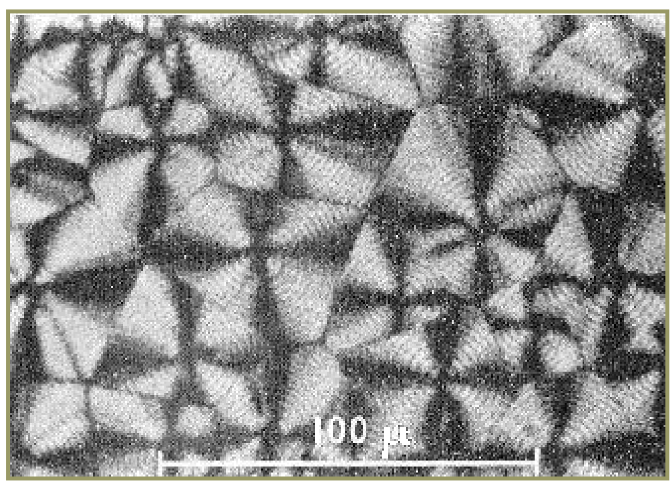


Imagen que muestra el crecimiento radial.
A: Punto de nucleación

Imagen de lamelas.





Fotografía de un material cristalino (PA 6,6) obtenido mediante cristales polarizados

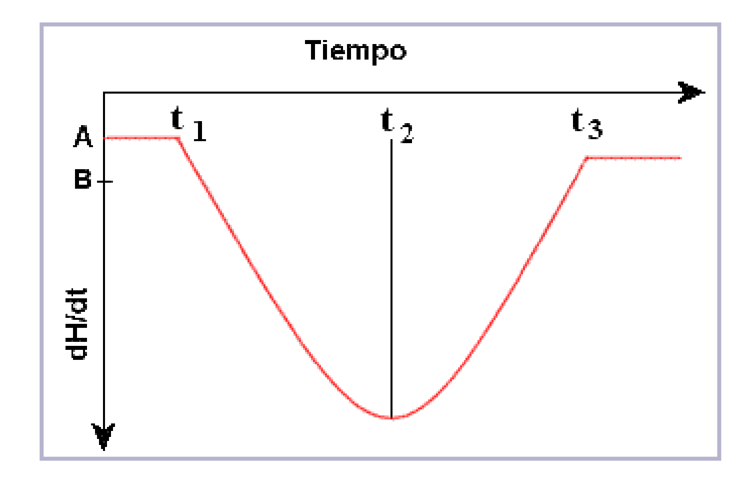
Al final del proceso de cristalización, obtenemos por tanto un material con una estructura esferulítica que se extiende por todo su volumen. Existen cadenas de polímero que pertenecen a lamelas distintas dentro de cada esferulita y contribuyen a la cohesión del material. Además, cadenas en las últimas lamelas de una esferulita pueden a la vez pertenecer a una lamela de una esferulita vecina, dando "uniones interlamelares", que contribuyen a la cohesión del material.Así, cada esferulita está compuesta por material tanto amorfo como cristalino, pero la estructura lamelar formada está compuesta por lamelas interconectadas radialmente, que en los bordes se conectan además con lamelas de la esferulita colindante.

Por ello, el material presenta cohesión a temperaturas entre Tg y Tm (hay que tener en cuenta que la fase amorfa no aporta rigidez si estamos por encima de la Tg).

- Crecimiento de cristales con el tiempo
- La cristalización a distintas temperaturas
- Postcristalización
- Propiedades Mecánicas de los semicristalinos

Crecimiento de Cristales con el Tiempo

Cuando se sigue la velocidad de cristalización con el tiempo a una temperatura determinada, se obtiene una gráfica como la que muestra la imagen. (mide el calor por cambio de estado cedido al molde durante la cristalización)



Se observa un tiempo inicial en el que la velocidad de cristalización es cero. Esta etapa se denomina de nucleación. Los cristales crecen a partir de un punto (el centro de la esferulita), que se llama núcleo. Una vez de que se ha formado este núcleo inicial, las lamelas crecen a partir de él. Puesto que éstas se van bifurcando y dividiendo en todas las direcciones del espacio, la superficie lamelar que puede ir adicionando cadenas aumenta con el tiempo (por así decirlo, aumenta la superficie de la esferulita).

Por ello la velocidad de cristalización va aumentando hasta un máximo. Esta etapa se denomina cristalización primaria y termina cuando las esferulitas tocan unas con otras. Al encontrarse entre ellas, la cristalización no puede seguir en las superficies que ya se han encontrado, y sólo puede hacerlo en las regiones que quedan entre las esferulitas. Por ello, la velocidad de cristalización se reduce y esta etapa se llama cristalización secundaria.



La Cristalización a Distintas Temperaturas

En el apartado anterior hemos visto que la cristalización es un proceso que necesita un tiempo. El tiempo necesario para la cristalización, así como la estructura del material cristalizado dependen de la temperatura a que se lleve a cabo. Cuando los cristales se forman a menores temperaturas (p. e. en el caso de piezas delgadas de ciertos materiales, que durante el moldeo se enfrían a gran rapidez), se observan dos efectos:

- Los núcleos se forman muy rápido, y son mucho más numerosos. Por tanto, la cristalización es más rápida, tenemos más esferulitas, y éstas son más pequeñas. El intervalo típico de tamaños es de 5 a 100 μm.

- Las lamelas formadas son más pequeñas e imperfectas. Esto se debe a que la inclusión de una cadena en un cristal implica vencer las fuerzas viscosas y de enmarañamiento de la cadena, presentes en la masa amorfa. Si la temperatura es baja, la movilidad de las cadenas es baja, y éstas tienen menor capacidad de vencer las fuerzas mencionadas. Por ello, la estructura cristalina de la lamela está "rota" con mayor frecuencia por cadenas mal empaquetadas.

En la práctica de la inyección, un aumento de cristalinidad se consigue con un enfriamiento más lento de la masa fundida (piezas de mayor espesor o alta temperatura del molde), o con los llamados formadores de núcleos o agentes nucleantes. Con el aumento de la cristalinidad aumentan también la densidad, la resistencia mecánica y la rigidez, pero disminuyen la transparencia y la capacidad de deformación.

Debido a que el enfriamiento de una pieza no es uniforme en su espesor, la estructura del material es distinta a distintos espesores. En las paredes, no hay esferulitas (todo el material es amorfo) o son muy pequeñas, mientras que en el centro se encuentran esferulitas mayores. Cuando las esferulitas son grandes, el material es más quebradizo. Ahora bien, también es más resistente al desgaste.

Ejemplo:

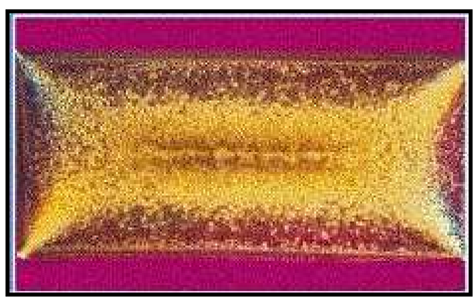
> Vamos a ilustrar el procesado de PA6. El grado de cristalinidad alcanzado por el material puede variar entre un 10 % (enfriamiento rápido) y un 50 % si el enfriamiento es lento. La pieza con un 10 % de cristalinidad tendrá una rigidez muy pequeña y una baja resistencia a la abrasión, puesto que la cristalinidad en las paredes será prácticamente nula. Para conseguir una mayor rigidez y resistencia a la abrasión, se añade al material un 0,1 % de sílice fina, que actúa como agente nucleante, y se procesa a temperaturas del molde más altas.

La cristalización sólo se da a temperaturas entre la Tm y la Tg (límite de movilidad molecular). El material debe estar entre ambas temperaturas el tiempo suficiente como para poder cristalizar de forma adecuada.

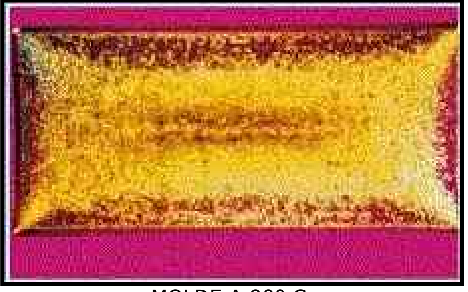
Si el fundido se enfría demasiado rápido (pieza delgada o molde muy frío), hay una piel importante de material mal cristalizado.



Influencia de la temperatura del molde en la estructura de POM



MOLDE A 40º C
Capa exterior insuficientemente cristalizada



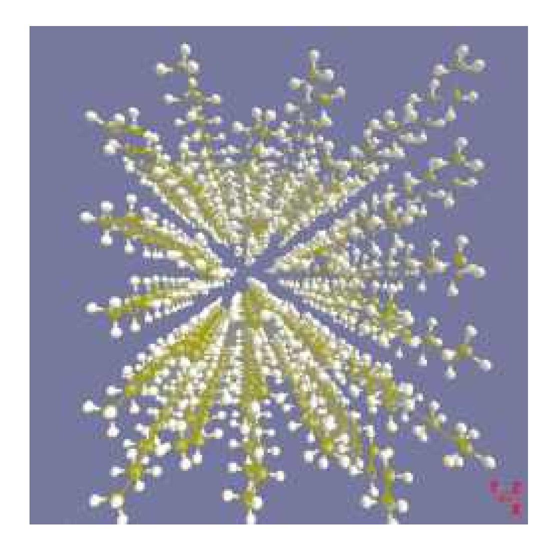
MOLDE A 90º C
Estructura óptima



Postcristalización

Cuando un material ha cristalizado adecuadamente, no cabe esperar fenómenos de postcristalización. Sin embargo, si un material se ha enfriado muy rápido, sin dejarle alcanzar su grado de cristalinidad natural, el material puede ir cristalizando lentamente a temperatura ambiente.

La velocidad de cristalización de un polímero es nula a la Tm. Suele ser máxima unos 20 ºC por debajo de la Tm, y a temperaturas menores va haciéndose cada vez más pequeña, debido a que disminuye la movilidad molecular (necesaria para vencer las fuerzas viscosas y el enmarañamiento). A temperaturas por debajo de la Tg del material se hace prácticamente nula, puesto que las cadenas se vuelven rígidas.



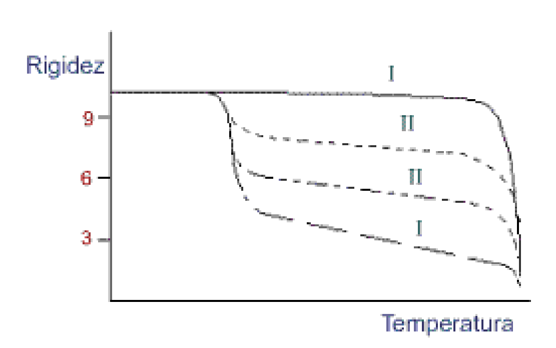
Tomemos el caso de la PA66. Este material, cuando está seco, tiene la Tg a 50 ºC.

Pero en condiciones de uso, absorben humedad y su Tg se reduce a unos 0 ºC. Por ello, a temperatura ambiente estos materiales pueden presentar postcristalización. Esta cristalización se produce muy lentamente y puede dar lugar a una contracción de la pieza que se puede alargar durante dos años. Con el nylon 6 este efecto no es tan marcado. Este proceso se puede acelerar por templado de las piezas a alta temperatura, pero ello conlleva el riesgo de contracción y deformación de la pieza debido a la relajación de la orientación (estiramiento en la dirección de flujo) de las cadenas moleculares.



Propiedades Mecánicas de los Semicristalinos

En la imagen se ve la rigidez de termoplásticos semicristalinos con distinto grados de cristalinidad frente a la temperatura.



Si el polímero es 100 % cristalino (situación que no se encuentra en la práctica), en la Tg no se observa ninguna variación en la rigidez del material. El material sigue manteniendo la rigidez casi constante hasta la temperatura de fusión. La pequeña pérdida de rigidez que se pueda observar antes de alcanzar la temperatura de fusión sólo es atribuible a la fusión de los cristales más pequeños e imperfectos.

Cuando el material es semicristalino (que es la situación real), se observa una pérdida de rigidez de relativa importancia en la Tg, tanto mayor cuanto menor sea la cristalinidad del material. Por debajo de la Tg, al igual que en los amorfos, el material es rígido pero frágil. Cuando se supera la Tg, el material puede representarse como unas regiones cristalinas rígidas e interconectadas (las lamelas), inmersas en un cuerpo gomoso, que es la parte amorfa. Los cristales no pueden separarse entre sí de forma importante, puesto que hay cadenas que pertenecen a varias cristalitas y éstas hacen de "ataduras" o "cuerdas" que impiden que el material pueda estirarse de manera importante ante tensiones moderadas. Por otro lado, la fase gomosa le da flexibilidad al material, por lo que puede flexarse sin romperse. Así, estos materiales, en el intervalo de temperaturas entre la Tg y la temperatura de fusión (Tm), son dúctiles. Además, entre la Tg y la Tm se observa que el material se vuelve más blando a medida que se calienta. Ello se debe tanto a la fusión de las cristalitas más pequeñas como al progresivo aumento de fluidez de la fase amorfa a medida que calentamos. Por último, cuando llegamos a la temperatura de fusión la fase cristalina se deshace, con lo que sólo nos queda fase amorfa. En la tabla siguiente se presentan las Tg y Tm de los materiales cristalinos más comunes:

	Densidad r (g/cm^3)	Tg (°C)	Tm (°C)	Grado de cristalinidad X_t (%)
LDPE	0,92	-100	120	40 - 55
HDPE	0,95	-100	130	60 - 80
PP	0,91	-10	175	60 - 70
PA6 *	1,13	50 / 0	225	50 - 60
PA6.6*	1,13	55 / 0	265	50 - 60
PBT	1,35	45	250	30 - 40
POM	1,76	-75	180	< 75

* Las poliamidas presentan dos temperaturas de transición vítrea: 50 ºC cuando no contiene humedad (Ej: en su procesado por inyección) y 0 ºC cuando contiene humedad (Ej: tras permanecer en contacto con la humedad del medio ambiente)

De la tabla anterior pueden concluirse algunos puntos importantes:



- El LDPE, HDPE, PP y POM tienen la Tg por debajo de temperatura ambiente. Ello significa que estos materiales son dúctiles a temperatura ambiente.

- Las poliamidas, cuando están secas, tienen la Tg a 50 ºC. Teniendo en cuenta que para poder inyectar un material es preciso secarlo antes, si las poliamidas se inyectan en un molde frío, pueden resultar frágiles, y romperse cuando para expulsar las piezas deban ser flexadas (por ejemplo, en el caso de las patillas de un tapacubos). Trabajar con el molde por encima de la Tg del polímero reducirá la importancia de este efecto. Pero aun así, si la patilla debe flexarse de manera importante, la deformación inducida puede no llegar a recuperarse totalmente. Con el tiempo, las poliamidas tienden a absorber agua del ambiente, y ello reduce su Tg hasta temperaturas por debajo de la ambiente. Por ello, en condiciones de uso, las poliamidas son también dúctiles.

- Para todos los materiales semicristalinos, se observa que la temperatura de fusión está unos 200 ºC por encima de la Tg, y la temperatura de proceso, temperatura a la que se inyecta el polímero, suele estar unos 250 ºC por encima de la Tg del material. Si comparamos con el caso de los amorfos, éstos suelen tener la Tg a una temperatura típica de 100 ºC, y las temperaturas de proceso suelen estar unos 150 ºC por encima de la Tg. Esta diferencia entre materiales amorfos y cristalinos se traduce en dos consecuencias importantes:

  a) Por un lado, los materiales cristalinos darán fundidos de menor viscosidad.

  b) Por otra parte, aumentar la temperatura del fundido en un material amorfo reduce mucho más la viscosidad del fundido que en un material cristalino.

- Por último, se debe mencionar que las poliamidas suelen dar fundidos de muy baja viscosidad. Esta particularidad se debe principalmente a que el polímero comercial suele tener un peso molecular relativamente bajo (M_W entre 10.000 y 30.000 g / mol).



Diferencias entre Amorfos y Cristalinos

Ya hemos explicado los distintas estados de agregación (amorfo o cristalino) que pueden adoptar las cadenas poliméricas. A continuación se relacionan los principales materiales amorfos y cristalinos:

AMORFOS	CRISTALINOS
PS	POM
ABS	PA6, PA6.6
PC	PBT
PVC	PE
PMMA	PP

Termoplásticos amorfos

No existe un punto de fusión, esto es, una temperatura a la cual se pasa de un sólido a un fluido. La única transición que se observa es la Tg. A esta temperatura, el material deja de ser un sólido vítreo (frágil), para ablandarse (adquiere un aspecto gomoso). A partir de aquí, el aumento de la temperatura hace que esa goma se vuelva cada vez más fluida, hasta que el material se comporta como un fluido viscoso a temperaturas del orden de 100 o 150 ºC por encima de la Tg.



Por tanto, obtenemos el fluido viscoso tras un proceso de reblandecimiento del material con la temperatura. Cuando el polímero se procesa, se inyecta a temperaturas por encima de la Tg, pero el molde no puede abrirse hasta que la pieza está por debajo de la Tg (pieza solidificada). Puesto que al pasar de estado sólido al de fluido no se produce ningún cambio en la estructura del material, el cambio de volumen de la pieza es pequeño. Por tanto, la contracción de las piezas moldeadas será mínima. Cuando se trata de un homopolímero sin cargas ni aditivos (esto es, polímero puro sin mezclar con otras sustancia), el material es transparente. Los polímeros amorfos son muy sensibles a disolventes muy comunes en pinturas y pegamentos, como son la acetona y el tolueno.

Termoplásticos semicristalinos

Los materiales cristalinos presentan una temperatura de fusión, en la que pasan directamente de estado sólido a fluido viscoso, sin pasar por la etapa gomosa. Los materiales cristalinos experimentan un cambio en la estructura del material en el punto de fusión. Las cadenas pasan de una disposición relativa ordenada a una disposición desordenada. Este aumento en el desorden hace que cuando el material funde aumente se expanda (el volumen aumenta del 5 al 15 %). Desde el punto de vista de procesado, la principal consecuencia es que se debe introducir más material en la fase de compactación. Para ello:

a) las entradas suelen ser algo más gruesas que para materiales amorfos, para evitar la congelación prematura.

b) Se suelen aplicar mayores tiempos de mantenimiento.

Aunque la compactación trata de reducir la contracción de la pieza, esta no se puede evitar del todo, y las piezas inyectadas en materiales cristalinos contraen más que las piezas inyectadas en materiales amorfos. Los valores típicos de contracción van del 1 al 3 %.

Los polímeros cristalinos tienen un "calor latente de fusión". (al igual que, para fundir el hielo, es necesario suministrar calor, para fundir los cristales de los plásticos debe suministrarse calor). En el procesado, el material cristaliza en la fase de enfriamiento y libera este "calor latente de fusión", por lo que el molde debe evacuar más calor. Por ello, el enfriamiento homogéneo de la pieza es más difícil. Este hecho, sumado a la mayor contracción, hace que estos materiales sean más propensos al alabeamiento o deformación.

Los materiales cristalinos nunca son transparentes, a lo sumo traslúcidos, debido a que la estructura del material no es homogénea: hay una fase cristalina en el seno de una fase amorfa. Son más resistentes a los disolventes, pero son sensibles a los ácidos.



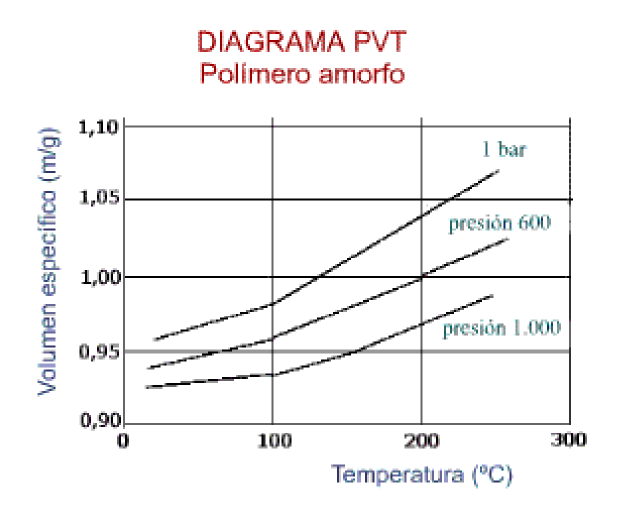
Comportamiento de Amorfos y Cristalinos en el Procesado

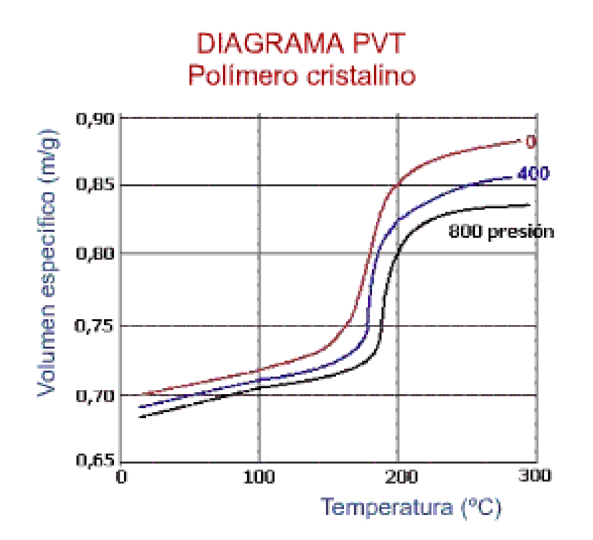
En general, puesto que los polímeros cristalinos dan fundidos de menor viscosidad que los amorfos, suelen ser más fáciles de inyectar (se requieren menores presiones de inyección). En la tabla siguiente se relacionan las longitudes de flujo (longitud máxima que el polímero puede recorrer en el llenado del molde durante el proceso de inyección) para plásticos comunes:

Polímero	Longitud de flujo (mm)
PS	≅ 150
SAN	≅ 140
HIPS	≅ 130
ABS	80 - 120
PMMA	100 - 150
PVC - P	180
PVC - U	≅ 60
PC	30 - 70
PPS (polisulfonas)	30 - 150
HDPE	150 - 200
PP	150 - 300
PA6	140 - 340
PA 6,6	180 - 350
PBT	160 - 200
Acetálicas (POM)	100 - 250

Tal y como se observa, los materiales cristalinos presentan mayores longitudes de flujo que los amorfos. De entre los amorfos, los estirénicos (excepto el ABS), presentan una longitud de flujo parecida, alrededor de 140 mm. El ABS puede ser algo más difícil de inyectar, dependiendo del grado escogido. El PVC - P es más fácil de inyectar, dada su elevada plastificación. El PVC-U y el PC son mucho más viscosos. Respecto a los cristalinos, las longitudes de flujo son mayores, llegando en la mayoría de los casos a 200 mm. Otra diferencia importante en cuanto al procesado está en los tiempos de mantenimiento a aplicar. Tras el llenado volumétrico de la cavidad, se aplica una presión de compactación durante un determinado tiempo, con el objeto de introducir material adicional en la cavidad para compensar su contracción térmica. Mediante un diagrama PVT, puede observarse con claridad que la cantidad de material adicional a introducir es mayor en el caso de polímeros cristalinos.







Puesto que los materiales amorfos contraen poco al enfriarse, es relativamente sencillo inyectar la cantidad de material necesaria para llenar y empacar. Por tanto, el mayor peligro es la sobrecompactación. Por ello, se emplean tiempos de segunda fase menores.

Los materiales cristalinos contraen más debido a la cristalización, por lo que se debe introducir más material. Además, debemos de esperar a que el material dentro de la cavidad cristalice para que, al contraerse, deje espacio adicional necesario para meter más material. Por ello se aplican mayores tiempos de segunda fase. La siguiente figura muestra la diferencia relativa entre ambos tipos de materiales:

MATERIAL CRISTALINO				
CIERRE MOLDE	INYECCIÓN	PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	ENFRIAMIENTO	APERTURA DEL MOLDE Y EXTRACCION

CICLO MATERIAL AMORFO				
CIERRE MOLDE	INYECCIÓN	PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	ENFRIAMIENTO	APERTURA DEL MOLDE Y EXTRACCION



Aditivos

Los plásticos, debido a su mismo proceso de fabricación, contienen pequeñas cantidades de materiales ajenos, por ejemplo emulsionantes y catalizadores. Durante el proceso de confeccionado y formulación posterior para convertirlos en granulados y masas de moldeo, los plásticos suelen recibir además pequeñas cantidades de aditivos, destinados tanto a facilitar su transformación como a modificar el cuadro de sus propiedades:

- *lubricantes* como auxiliares de transformación
- *estabilizantes* contra la degradación térmica durante la transformación y para la protección contra el envejecimiento y la radiación UV durante el uso
- *productos antiestáticos* para evitar la carga electrostática
- *aditivos conductores*, por ejemplo negro de humo para reducir los valores de resistencia eléctrica

HILOS DE POLIAMIDA



Sin aditivos Con estabilizante

- *ignifugantes* para reducir la combustibilidad
- *colorantes* para teñir
- *plastificantes y flexibilizantes* para mejorar la resistencia al impacto
- *cargas minerales y fibras de refuerzo* para modificaciones concretas del conjunto de propiedades
- *hinchantes* para espumar

En general todo aditivo debe cumplir los siguientes requerimientos, a no ser que precisamente parte de su utilidad se base en incumplir alguno de ellos:

1) Deben ser eficientes en su función.

2) Deben ser estables en las condiciones de proceso.

3) Deben ser estables en las condiciones de uso.

4) No deben ser sangrantes, exudar o migrar.

5) No deben ser tóxicos ni impartir olor o sabor.

6) Deben ser baratos.

7) No deben afectar negativamente las propiedades del polímero.



La mayoría de estas propiedades son evidentes, aunque la condición de sangrado, exudado o migración puede necesitar una explicación más amplia. La migración y/o sangrado se produce cuando un determinado aditivo pasa a través de la interfase que separa un material de aquél inmediatamente en contacto, es decir se produce una migración del aditivo desde el material polimérico hasta aquella sustancia en contacto con el mismo. Este efecto suele producirse cuando el aditivo puede solubilizarse con el polímero y asimismo con la sustancia en contacto, ya sea líquida o sólida. Este efecto producirá una contaminación del producto en contacto ya sea en forma de cambio de color, reblandecimiento, perdida de propiedades, etc. Y será un efecto controlado por las leyes de difusión. Dependerá por tanto del tamaño de poro de la superficie del polímero, del tamaño de la partícula que difunde y de la concentración en el polímero de partida. Habrá también un cierto efecto según el polímero se encuentre por encima de su Tg o Tm.

La exudación es un fenómeno de naturaleza diferente, aunque puede dar lugar a consecuencias similares. Se basa también en la solubilidad, y es debida a la variación de la solubilidad existente entre el polímero y el aditivo en condiciones de proceso y en condiciones de servicio. Así un par polímero aditivo son totalmente solubles en la proporción empleada en el momento de la transformación, pero una vez en condiciones de uso, al enfriar, esta solubilidad disminuye, con lo cual una cierta cantidad de dicho aditivo aflorará a la superficie de la pieza. Este efecto puede ser deseable y se emplea como protección ante agentes externos mediante el empleo de parafinas para proteger piezas de caucho, pero en general debe evitarse, ya que además de la perdida de este aditivo, al salir puede arrastrar a otros en el camino produciendo gradientes de concentración de aditivos o pérdida de los mismos.

Veamos para qué se utilizan los aditivos citados anteriormente:

- Plastificantes
- Lubricantes y promotores de flujo
- Cargas y fibras
- Aditivos antienvejecimiento
- Colorantes y pigmentos.
- Ignifugantes.
- Hinchantes.





Plastificantes

Ha sido una práctica habitual el mezclar plastificantes con polímeros desde que Alexander Parkes introdujo la Parkesina en el mercado. Se encontró de esta forma que mediante la adición de sustancias plastificantes se servía a dos propósitos de gran importancia; se reduce la viscosidad en el fundido, favoreciendo el flujo, y se varían de forma significativa algunas de las propiedades de la pieza terminada disminuyendo la rigidez y aumentando la flexibilidad.

Un plastificante es una sustancia que debe tener un parámetro de solubilidad parecido a aquel del polímero y un peso molecular de al menos 300. Este requerimiento de peso molecular es debido a que un plastificante de bajo peso molecular es una sustancia volátil, y por tanto poco estable en una pieza polimérica, daría grandes problemas de migración y sangrado.



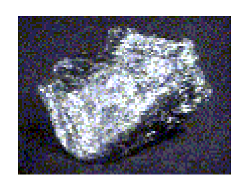


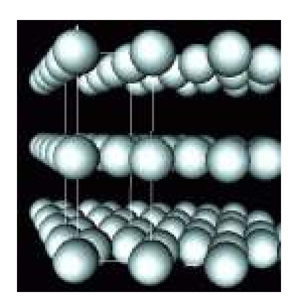
Lubricantes y Promotores de Flujo

El término lubricante se encuentra muy a menudo en la bibliografía referida a polímeros como aditivo que se incorpora al material plástico. Hay sin embargo varios tipos de lubricantes con diferentes funciones, y es conveniente saber distinguirlos. Los tres tipos principales son:

- *Materiales que reducen la fricción de los moldeados* y otros productos terminados cuando sus respectivas superficies (del mismo u otro material) son deslizadas la una con respecto a la otra. Los mejores ejemplos de este tipo de lubricante son el grafito y el disulfuro de molibdeno, que se emplean en proporciones que van del 1 al 2 % en rodamientos, juntas, etc. de nylon y otros termoplásticos.

El grafito es negro, blando y un lubricante excelente. Los átomos de carbono del grafito están distribuidos en forma de capas paralelas separadas. La separación entre las capas es mayor que la separación de los átomos de un a misma capa. Debido a esta unión tan débil, los deslizamientos de las capas ocurren sin gran esfuerzo.





- *Materiales que durante el procesado exudan con respecto a la matriz de polímero hacia la interfase que existe entre la masa fundida y la superficie metálica del equipo de transformación.* La película resultante evita que el polímero se adhiera a la maquinaria y facilita el procesado. Estos aditivos son conocidos como lubricantes externos, y tienen una baja compatibilidad con el polímero, son en general altamente polares y tienen por tanto bastante afinidad con los metales. La selección de un tipo u otro de lubricante externo dependerá no sólo del polímero, sino también de la temperatura de proceso, ya que tal como hemos explicado anteriormente la temperatura hace variar las constantes de solubilidad de los materiales. Para el caso del PVC uno de los más empleados es el ácido esteárico y sus sales de calcio, plomo, cadmio o bario, si bien en la actualidad varias de estas sales están prohibidas para productos que vayan a estar en contacto con alimentos. Otros podrían ser el ácido myristico, o hidrocarburos como ceras parafínicas o PE de muy bajo peso molecular, e incluso algún éster (palmitato).

  Debido a que la función de estos lubricantes consiste en exudar de la matriz polimérica durante el procesado, pueden ocurrir distintos problemas, sobre todo si se emplea un exceso. Por ejemplo podría arrastrar otros aditivos, colorantes, etc., contaminando las formulaciones sucesivas procesadas en el equipo de transformación. Puede también afectar a la claridad o acabado del producto, o impedir la impresión o sellado térmico de una lámina moldeada.



El tercer grupo de lubricantes consiste en materiales de bajo peso molecular, pero que a diferencia de los plastificantes tienen poco efecto en las propiedades finales del producto terminado. A este grupo se le ha venido a denominar *lubricantes internos*. Algunos lubricantes internos empleados con PVC son: ceras amínicas, derivados de ésteres de ceras montan, ésteres de glicerina (monoesterarato de glicerina), y ésteres de cadena larga como el palmitato de cetilo. Como en el caso anterior la proporción de lubricante puede ser bastante crítica con respecto a las propiedades finales. Debido a que se pretende que los lubricantes internos tengan poco efecto sobre las propiedades finales (poco reblandecimiento, etc.), se han desarrollado los llamados *promotores de flujo poliméricos*, son polímeros con índice de solubilidad cercano al del polímero de partida, pero de menor viscosidad a la temperatura de procesado, pero no necesariamente más flexible o blando a la temperatura de servicio.

Cargas y Fibras

El término cargas se emplea generalmente para denominar aquellas sustancias de carácter sólido que se incorporan al polímero para modificar sus propiedades físicas, generalmente sus propiedades mecánicas.

Veremos para qué se utilizan las siguientes cargas y fibras.

- Particulas
- Elastómeros
- Fibras
- Agentes de acoplamiento





Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas.



Partículas

Se dividen en dos tipos de partículas aquellas que tienen efecto reforzante y las partículas denominadas inertes. Estas partículas inertes producen de todas maneras un efecto sobre las propiedades del polímero, así la adición de una carga no reforzante a un compuesto de PVC plastificado aumentará su rigidez y la dureza, pudiendo además mejorar el aislamiento eléctrico o reducir la pegajosidad del producto. Sobre todo tendrán un efecto importante sobre el precio del producto, ya que la razón fundamental por la que se añaden las cargas inertes es reducir el coste del producto terminado. Una carga no reforzante tendrá en la mayoría de los casos que ser una sustancia insoluble en la mayoría de los disolventes con que podría entrar en contacto el producto polimérico terminado. Algunos de los más empleados son: Carbonatos cálcicos, talco, sulfato de bario, etc.

Estas cargas se pueden encontrar en el mercado en distintos grados dependiendo de:

- Tamaño medio de partícula y distribución de tamaños.
- Forma de la partícula y porosidad.
- Naturaleza química de la superficie.

Cuanto menor es el tamaño de partícula, mayor será el refuerzo de propiedades como el módulo de tracción, dureza, etc., hasta llegar a una concentración crítica, a partir de la cual las propiedades disminuyen. Partículas grandes tenderán a dar productos cuyas propiedades serán peores que las de la resina sola.

La forma de la partícula tendrá también su influencia. Por ejemplo una partícula muy empleada como la arcilla de china tiene una forma ovalada plana, que tiende a orientarse durante el procesado dando lugar a productos anisotrópicos.Otros refuerzos pueden tener superficies irregulares y ser de difícil mojado por el polímero (dan lugar a peor reparto de esfuerzos) o tener una superficie muy porosa, de tal manera que otros aditivos son absorbidos y pierden su efectividad.



Arcilla china o cailón

La naturaleza química de la superficie de la partícula puede tener un efecto vital, la gran mayoría son compuestos con grupos polares, por lo que su adherencia al polímero es bastante reducida, sin embargo puede tener bastante afinidad con otra serie de aditivos como pueden ser antioxidantes, agentes de reticulación, agentes ultravioleta, etc. Para mejorar la adherencia al polímero, e impedir una baja de rendimiento de otros aditivos, se suelen emplear las cargas tratadas bien con glicoles o ácidos orgánicos e incluso más recientemente con *agentes de acoplamiento*. El carbonato cálcico es tratado con ácido esteárico, el grupo ácido se adhiere a los grupos polares del carbonato, mientras que la cadena alifática es compatible con la cadena hidrocarbonada del polímero. El uso de glicoles o aminas para tratar arcillas, etc., cumple además la función de -al tratarse de aditivos baratos- ser ellos los que ocupan la superficie de la carga, dejando libres a aditivos que cumplen una función específica.

Las partículas reforzantes son especialmente efectivas con elastómeros aunque pueden también aumentar la resistencia a la tracción de productos de PVC plastificado.



Elastómeros

Es corriente el uso para su incorporación a termoplásticos amorfos de materiales elastoméricos para mejorar su resistencia al impacto. Algunos ejemplos bien conocidos son el empleo de SBR y polibutadieno en el caso del PS (HIPS) acrilonitrilo - butadieno (NBR) para el PVC, y el copolímero etileno-propileno para el polipropileno. Este efecto de mejora de propiedades se explica generalmente mediante la teoría de propagación de las grietas. La mayor parte de las tensiones son soportadas por la fase rígida (termoplastico) hasta el momento del agrietamiento. A partir de este momento y debido a que la fase elastomérica no es muy compatible con la matriz vítrea (termoplástico), se encuentra en forma de gotas. Cuando se inicia la grieta alrededor de una gota elastomérica ésta se encuentra tensionada no solo en la dirección del esfuerzo aplicado, sino también en el plano de la grieta, es decir perpendicular al esfuerzo aplicado.

Un esfuerzo triaxial de este tipo es respondido por el modulo másico de la partícula elastomérica, de tal manera que soporta el esfuerzo aplicado.

Las partículas elastoméricas no deben ser de un tamaño tal que se encuentren totalmente embebidas en la grieta, sino que deben evitar la propagación de la misma. Por otra parte se ha comprobado que la existencia de muchas grietas distribuye el esfuerzo que de otra manera se encontraría concentrado en unas pocas grietas. Además al llegar la grieta en propagación a una partícula elastomérica a menudo se divide, creando una mayor superficie y disipando de esa manera mucha energía.



Ruedas de elástomero



Fibras

Las cargas fibrilares han sido empleadas desde hace mucho tiempo para reforzar los polímeros termoplásticos. Fibras de algodón, Nylon, celulósicas e incluso astillas de madera han sido empleadas durante años. Este tipo de cargas pueden mejorar la resistencia al impacto, la dureza y rigidez de los productos moldeados. También se emplean fibras de origen inorgánico como fibra de vidrio o asbesto tanto con termoplásticos como termoestables, siempre que se precise resistencia a la temperatura y dureza.

Más recientemente se han empleado fibras cortas de carbono y monocristales de alta relación longitud / diámetro y alta dureza.

Las fibras se encuentran muchas veces en forma laminar embebidas en la matriz polimérica. En general la fibra tiene un módulo (rigidez) superior al de la resina en que se encuentra embebida, así que cuando un composite es sometido a un esfuerzo en la dirección del plano de la capa fibrilar, la mayor parte del esfuerzo lo soporta la fibra, correspondiendo un mayor valor del módulo (rigidez) y resistencia que el correspondiente a la resina sin reforzar.



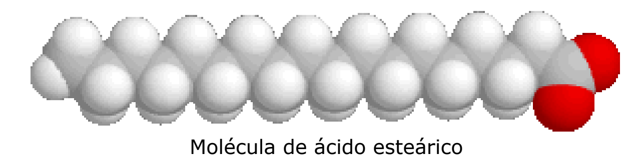
Planta del yute.
La fibra del yute puede servir para reforzar la materia plástica.

Agentes de Acoplamiento

Una carga no puede ser empleada de manera eficaz a no ser que exista buena adhesión entre ella y la matriz polimérica. Es más, en la interfase matríz - carga no habrá un buen reparto de tensiones y será por lo tanto un punto débil del material.

Una aproximación empleada durante años ha sido el empleo de aditivos con dos partes activas. Una parte es compatible con la carga y la otra con el polímero.

Este ejemplo se ha dado anteriormente para el caso de carbonato cálcico tratado con ácido esteárico, o arcillas tratadas con aminas.



Molécula de ácido esteárico



Aditivos Antienvejecimiento



Las propiedades de la mayoría de los polímeros varían con el paso del tiempo al estar en contacto con el medio ambiente. Dichos cambios de propiedades tienen en general relación con una modificación estructural que corresponde en general a uno de estos cuatro motivos:

a) Escisión de cadena. (Pérdida de resistencia y tenacidad o dureza)

b) Entrecruzamiento que puede conducir a aumento de la dureza, fragilidad y cambios en la solubilidad. (Prinicipalmente en el caso de elastómeros)

c) Cambio de color.

d) Desarrollo de grupos polares, como pueden ser grupos carbonilos en las poliolefinas, que producen variaciones en el poder aislante eléctrico del material, así como cambios en la actividad química de la cadena polimérica.

Estos cambios estructurales son consecuencia de reacciones químicas entre las que se cuentan la oxidación (reacción con el oxigeno atmosférico), el ataque de ozono (principalmente en el caso de los elastómeros), y el ataque de radiación ultravioleta.

Para impedir que el polímero se degrade se utilizan los siguientes aditivos antienvejecimiento:

- Antioxidantes
- Estabilizantes Ultravioleta



Antioxidantes

El antioxidante impide que el polímero absorba oxígeno y de esta manera el polímero no se degrada. Cuando el antioxidante se ha consumido, la captación de oxígeno es rápida. A lo largo de los años se han desarrollado dos grupos principales de antioxidantes: las aminas y los fenoles.

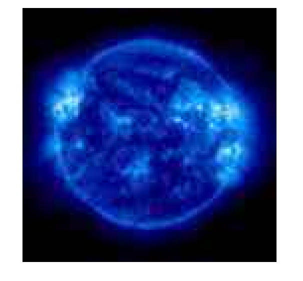
Para plásticos se prefieren en general los fenoles porque ocasionan menos problemas en cuanto a la aparición de manchas o coloreamiento; igualmente son menos propicios a la exudación y al sangrado. Sin embargo, las aminas son aún muy utilizadas en neumáticos de caucho, ya que en este tipo de aplicaciones los inconvenientes anteriores son ampliamente compensados por el costo favorable y por la eficacia de estos materiales. Estos materiales se utilizan en proporciones del orden de 0,02 - 1 %. Si se utilizan en exceso pueden tener efectos prooxidantes, es decir, pueden facilitar la oxidación.



Estabilizantes Ultravioleta

Cuando los materiales plásticos son expuestos a la luz ultravioleta, especialmente en atmósfera de oxígeno, tienen lugar diversos procesos químicos y físicos que producen alteraciones como coloreamiento, agrietamiento en la superficie, endurecimiento y variaciones en las propiedades eléctricas.

Estos efectos difieren de un polímero a otro, ya que los polímeros poseen naturaleza química distinta. Para la mayoría de las aplicaciones los efectos de la luz ultravioleta no son deseables. Sin embargo, a veces pueden ser utilizados de forma positiva, como por ejemplo en el secado de tintas y pinturas poliméricas.



Hinchantes

Aparte de inyectar gases a presión en los productos en espumación o de liberarse gases por reacción química durante el proceso de producción, es posible también adicionar hinchantes sólidos a los plásticos que se vaporizan por acción del calor aportado y, de esta manera, espuman al plástico.





Colorantes y Pigmentos

Cabe distinguir entre pigmentos tanto orgánicos como inorgánicos, insolubles en el plástico; mientras que los colorantes son solubles en el mismo. Intervienen en un porcentaje entre el 0,5 % y el 2 %.

Los pigmentos con tamaño de partícula normal confieren al plástico color y opacidad, mientras que los colorantes solubles tienen gran importancia para teñir piezas o semifabricados de plásticos transparentes (PMMA, PS, PC). A ellos hay que añadir los colorantes fluorescentes o colectores de luz. Si los colorantes o pigmentos se adicionan en porcentajes bajos, por lo general no se altera el cuadro general de propiedades de forma considerable.

Los productos de color normalmente vienen ya incorporados al granulado listo para procesar. No obstante, se pueden mezclar también en forma pulvurulenta con el granulado natural del plástico (sin teñir) y homogeneizar la mezcla de ambos pasándolos por la extrusora. Otra posibilidad de teñido consiste en adicionar un masterbatch, es decir, un concentrado de color en forma de granulado, al granulado de material plástico natural (sin teñir) y homogeneizarlos procesándolos en extrusora o directamente en la máquina de inyección.



Ignifugantes

Los ignifugantes están destinados a reducir la combustibilidad de los plásticos. Intervienen en el proceso de combustión reduciendo la inflamabilidad y dificultando la combustión. Se utilizan, por ejemplo, el hidróxido de aluminio $Al(OH)_3$, productos bromados, clorados y fosforados.

Observación: se pueden desprender productos corrosivos; en los incendios, el PVC se descompone liberando ácido clorhídrico, que puede producir daños secundarios. Algunos ignifugantes, por ejemplo los bromados, es posible que den coloraciones oscuras. Los ignifugantes dificultan en parte la entrada de oxígeno. Las cargas minerales y las fibras de refuerzo influyen en el comportamiento a la llama de los plásticos, puesto que reducen el porcentaje de material combustible.


Productos de PVC



Termoplásticos Industriales y de uso General

Entre los más utilizados en España, destacan el Polietileno de Alta Densidad (PEad) con 14,85 kilos por habitante, el Polipropileno (PP) con 14,12 kilos, el Poli cloruro de Vinilo (PVC) con 14,04 kilos, el Polietileno de Baja Densidad (PEbd) con 11,48 kilos, el PET con 6,94 kilos y el Poli estireno (PS) con 6,32 kilos.

Los termoplásticos industriales y de uso general se dividen en:

- Poliolefinas
- Polímeros de cloruro de vinilo (PVC)
- Polímeros de estireno
- Poli(metacrilato de metilo) (PMMA)
- Poliamidas
- Poliésteres lineales (poli(tereftalatos de alquileno)) PET, PBT



Poliolefinas

Las poliolefinas son termoplásticos semicristalinos que se caracterizan por una buena resistencia química y un buen aislamiento, eléctrico.

Se pueden transformar con facilidad por casi todos los procedimientos convencionales y su precio es económico; por estas razones han tenido una amplia aceptación y se han convertido en el grupo más importante de plásticos de nuestros días.



Se emplean básicamente el polietileno y el polipropileno. Para cometidos excepcionales se recurre a poliolefinas especiales.

- Polietileno
- Polipropileno



Polietileno (PE)

- **Estructura:**

- **Propiedades:**

Densidad: PE - LD (low density) ramificado, de 0,914 a 0,94 g / cm^3; PE - LLD (linear low density) de 0,918 a 0,943 g / cm^3; PE - HD (high density) lineal, de 0,94 a 0,96 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos no polares, semicristalinos, con distintos grados de ramificación y, por consiguiente, de cristalinidad que va del 40 al 55 % en los PE - LD y del 60 al 80 % en los PE - HD. Prácticamente no absorben humedad.

Material de refuerzo: en algunos PE - HD son fibras de vidrio.

Color: su coloración natural es blanca lechosa, opaca; sólo en las láminas muy delgadas llegan a ser casi transparentes. Se pueden teñir en cualquier tono opaco.

Propiedades mecánicas: las propiedades mecánicas y químicas dependen de la cristalinidad (caracterizada por la densidad) y del grado de polimerización (caracterizado por el índice de fluidez M.F.I, concepto similar a la viscosidad). Por tanto, uno de los tipos de PE se ajustará con facilidad a las exigencias propuestas.
Según la cristalinidad pueden ser entre blandos y rígidos. Flujo en frío sobre todo en los PE - LD. Dependen de la cristalinidad (densidad): la resistencia mecánica, la tracción, el módulo de elasticidad y la resistencia al impacto.

Propiedades eléctricas: excelente aislamiento eléctrico. Las propiedades dieléctricas son casi independientes de la densidad, índice de fluidez, temperatura o frecuencia. No es posible un calentamiento por UHF. Normalmente la carga electrostática es alta; por lo tanto, tienden a acumular polvo. En muchos casos se intenta contrarrestar este efecto con aditivos antiestáticos. La conductividad se aumenta con un 25 a un 30 % de negro de humo.

Propiedades térmicas: temperatura máxima de uso de los PE - LD alrededor de 60 ºC; de los PE - HD hasta 95 ºC. Por poco tiempo, puede ser más alta. En frío, a -50 ºC, se vuelven frágiles. Si el peso molecular es elevado, la temperatura de fragilización puede ser más baja.

Margen de fusión de cristalitos PE - LD de 105 a 115 ºC, PE - HD de 125 a 140 ºC.

Resisten a: ácidos diluidos, álcalis, soluciones salinas, agua, alcohol, ésteres, aceites, el PE-HD resiste incluso a la gasolina. Por debajo de 60 ºC son prácticamente insolubles en casi todos los disolventes orgánicos.



No resisten a: oxidantes fuertes, sobre todo en caliente. El PE - LD se hincha en contacto con hidrocarburos alifáticos o aromáticos. La permeabilidad a gases como el oxígeno y aromas es mayor que en la mayor parte de los plásticos restantes. Permeabilidad muy reducida al vapor de agua.
Si se exponen a radiación solar directa se hacen quebradizos: se contrarresta adicionando un 2 a 2,5 % de negro de humo; es importante para la utilización del PE en el exterior.

Propiedades fisiológicas: inodoro, insípido e indiferente fisiológicamente. En la mayoría de los casos se ha autorizado su uso para contacto con alimentos.

Ejemplos de aplicación:

Maquinaria y automoción: asas, tiradores, tapones, juntas, revestimiento anticorrosivo, fuelles de dilatación, cajas de batería, depósitos de carburante, bobinas textiles, revestimiento interior.

Electrotecnia: aislamiento para cables de telecomunicaciones y alta tensión, tubos para instalaciones eléctricas, cajas de distribución, núcleos de bobina, conos de aireación para electromotores.

Construcción: tuberías de agua potable y desagüe; tuberías de calefacción, codos, cubos, láminas de forrado, láminas de impermeabilización, depósitos de gasoil, césped artificial.

Transporte: contenedores, depósitos, cajas - botellero, bidones, garrafas, láminas de envasado, láminas retráctales, botellas, tubos cosméticos, botes, contenedores y cubos de basura, láminas para bolsas de mano, láminas multicapa.

Diversos: juguetes de todo tipo, recipientes de uso doméstico, capa deslizante de los esquís, monofilamentos para tejidos y sogas.



Polipropileno (PP)

- **Estructura:**

$$\left[-\overset{H}{\underset{H}{C}} - \overset{H}{\underset{CH_3}{C}} - \right]_n$$

- **Propiedades:**

Densidad: de 0,895 a 0,92 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos semicristalinos, en su mayor parte no polares, con un grado de cristalinidad entre el 60 y el 70 % debido al predominio del ordenamiento isotáctico de los grupos metilo. Los copolímeros con etileno tienen mayor resistencia al impacto (incluso a bajas temperaturas) y mayor estabilidad en intemperie.

Cargas de relleno y materiales de refuerzo: talco (contracción muy baja), harina de madera, fibras de vidrio, esferillas de vidrio, fieltros (mats) de fibra de vidrio para piezas de gran extensión (GMT - PP: propileno termoplástico reforzado con mats de fibra de vidrio), negro de humo.

Color: su tonalidad natural va desde ligeramente transparente hasta opaca. Se puede teñir en muchos colores opacos con alto brillo superficial.

Propiedades mecánicas: rigidez, dureza y resistencia más altas que en el PE, pero menor resistencia al impacto con probeta entallada. Se puede fijar con clavos. Es conveniente reforzar con fibras de vidrio las piezas sometidas a grandes esfuerzos.

Propiedades eléctricas: parecidas a las del PE. Características dieléctricas independientes de la frecuencia; por lo tanto, no es posible ningún calentamiento por UHF. Sus acusadas propiedades aislantes hacen que tienda a cargarse electrostáticamente y a acumular polvo, por lo cual se recomienda agregarle aditivos antiestáticos.

Propiedades térmicas: a temperaturas elevadas, el PP puro tiende a oxidarse; por consiguiente, todos los tipos de PP tienen que estabilizarse. Su temperatura de uso máxima en el aire es de 110 ºC; si la estabilización es más fuerte y los tipos están reforzados, la temperatura de uso puede ser algo mayor. La temperatura de fragilización es de 0 ºC; la de los tipos modificados es algo inferior.

Intervalo de fusión de cristalitos de 158 a 168 ºC.

Resistencia química a: soluciones acuosas de ácidos inorgánicos, ácidos orgánicos débiles y lejías, alcohol, algunos aceites. Soluciones de las coladas habituales hasta 100 ºC.

No resiste a: oxidantes fuertes. Hinchamiento en hidrocarburos alifáticos y aromáticos como bencina, benceno, sobre todo a temperaturas altas. Hidrocarburos halogenados. Algunos tipos no resisten el contacto con el cobre.

Comportamiento fisiológico: inodoro, insípido. Idóneo para muchos usos del sector alimentario y farmacéutico. Fisiológicamente inocuo.



Ejemplos de aplicación:

Maquinaria y automoción: conductos de calefacción y refrigeración, fuelles de dilatación, trampillas de aireación, pedales de acelerador (con bisagra tipo film), carcasa de bombas, planchas de tapa, ventiladores, tubos soporte y bobinas para tintura..

Artículos domésticos: aparatos de cocina, cubertería, láminas resistentes a ebullición, carcasas de electrodomésticos, piezas interiores de lavavajillas, tambor (bombo) de lavadoras, botellas y tapones (bisagra tipo film).

Electrotecnia: carcasa de transformadores, cubierta de cables, piezas de instalación, cajas de batería, accesorios de antenas.

Construcción: tuberías de desagüe y codos, tuberías para calefacción en pavimento, radiadores, depósitos de agua caliente.

Diversos: cascos (mitades) de maleta, maletas con bisagra tipo film, cajas para herramientas, cajas de transporte, recipientes con bisagras tipo film, cintas para envasado, maromas (flotantes), monofilamentos, cordeles, sacos. Fieltros, pistas de esquí en verano, tacones de zapato, aparatos médicos esterilizables, jeringuillas desechables, recipientes de transfusión.



Polímeros de Cloruro de Vinilo

Los polímeros de cloruro de vinilo son, en su mayor parte, termoplásticos y presentan buena resistencia química y, estabilizados debidamente, buena estabilidad a la luz y a la intemperie. Las propiedades se pueden modificar mediante copolimerización o con polimerización de injerto, o bien por mezcla con termoplásticos de consistencia blanda-elástica, lo cual permite mejorar considerablemente la resistencia al impacto (PVC - HI), por ejemplo. La flexibilidad del PVC es posible ajustarla dentro de amplios márgenes con la adición de plastificantes.

Sus buenas propiedades y las múltiples posibilidades de transformación hacen que el PVC pueda utilizarse en muchos sectores, desde el cuero artificial hasta la pieza de inyección o el perfil extruido.

Policloruro de vinilo (PVC)

- La estructura del cloruro de vinilo (PVC) es la siguiente:

$$\left[-\overset{H}{\underset{H}{C}}-\overset{H}{\underset{Cl}{C}}- \right]_n$$

- **Propiedades generales:** termoplásticos polares, amorfos en su mayor parte, sus propiedades dependen del grado medio de polimerización. Si aumenta dicho grado, aumenta también la resistencia mecánica, la resistencia a la deformación por calor y la estabilidad a largo plazo, pero aumentan también las dificultades de transformación.

Difícilmente inflamable, desprende humos espesos.

Las propiedades del PVC y su transformación se mejoran con la incorporación de aditivos, tales como estabilizadores, lubricantes, colorantes, etc. El resultado de la mezcla se llama compound.

El poli(cloruro de vinilo) puede ser de dos tipos:

- Policloruro de vinilo rígido (PVC - U) (sin plastificantes).
- Policloruro de vinilo plastificado (PVC - P)



Policloruro de vinilo rígido (PVC-U)

Propiedades:



Densidad: 1,37 - 1,44 g / cm^3; el PVC clorado, 1,55 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos polares, amorfos en su mayor parte. Escasa absorción de agua.

Color: el PVC - S y el PVC - M pueden fabricarse transparentes; es posible darles cualquier color en transparente y en opaco. El PVC - E y el (PVC + NBR) son opacos y sólo admiten colores cubrientes.

Propiedades mecánicas: gran resistencia mecánica, rigidez y dureza. Son sensibles a la entalla; los tipos de alto impacto (PVC - HI) son menos sensibles a la entalla.

Propiedades eléctricas: aislamiento normalmente satisfactorio (menor en el PVC - E), pero con una resistencia a las corrientes de fatiga no muy buena. Sus grandes pérdidas dieléctricas los excluyen de aplicaciones para altas frecuencias.

Propiedades ópticas: el PVC transparente para aplicaciones "ópticas" secundarias al aire libre, sobre todo los tipos a base de PVC - M.

Propiedades térmicas: el PVC rígido puede utilizarse hasta aproximadamente +60 ºC, los copolímeros hasta +80 ºC, el PVC - C hasta 90 ºC. Fragilidad a -5 ºC, los tipos resistentes al impacto hasta -40 ºC.

Resistente a: soluciones salinas, ácidos diluidos, a veces incluso concentrados; álcalis diluidos y concentrados; disolventes no polares, bencina, aceites minerales, grasas, alcohol. Resiste relativamente bien a radiaciones energéticas intensas, y bien a la luz y a la intemperie, si está debidamente estabilizado.

No resiste a: disolventes polares, por ej. ésteres, hidrocarburos clorados, cetonas, hidrocarburos aromáticos. Benceno, halógenos líquidos, ácidos sulfúrico y nítrico concentrados.

Disolventes: tetrahidrofurano, ciclohexanona.

Propiedades fisiológicas: indiferente; con los estabilizadores autorizados está admitido incluso para envasado de alimentos; en tal caso, el contenido de monómeno está limitado a < 1 ppm.

Ejemplos de aplicación:



Mecánica y fabricación de aparatos: tuberías de presión, uniones de tubos, codos de unión, canales de aireación, válvulas, bombas, depósitos para la industria química, revestimientos, láminas grabadas (cintas Dymo por el efecto de huella blanca).

Construcción: canalones, tuberías de desagüe, de agua pluvial, de gas, para transporte de efectos postales, de drenaje, listones de persiana enrollable, perfiles de ventana, claraboyas, placas onduladas, elementos de fachada, pozos de ventilación, setos antideslumbrantes, perfiles huecos, planchas expandidas.

Electrotecnia: tubos aislantes, tapas transparentes para armarios de distribución, bandejas portacables, discos de música.

Industria del envase: botellas estancas (sin difusión) para aceite y bebidas, copas para yogur y similares, blísters y envases tipo lámina.



Policloruro de vinilo Plastificado (PVC - P)

Estructura: PVC con un 20 - 50 % de plastificante. La caracterización de los tipos se realiza indicando su dureza Shore A.

Principales plastificantes:

1.- Ésteres de ácidos polibásicos con alcoholes monovalentes, por ej. el plastificante estándar es el DOP (ftalato de dioctilo).

2.- Plastificantes poliméricos.

Las mezclas de PVC, plastificante, estabilizadores, lubricantes, cargas y pigmentos se gelifican en la mezcladora, transformándose después (en molino de cilindros o en extrusora) en semifabricados o en masas de moldeo.

Propiedades:

Densidad: 1,20 - 1,35 g / cm^3.



Estructura: como la del PVC rígido, pero con moléculas de plastificante intercaladas entre las cadenas moleculares (plastificación externa); amorfos.

Cargas de relleno: creta, caolín, harina de sílice, negro de humo. En los pavimentos sintéticos se llega hasta el 50 % de cargas.

Color: es posible el tipo transparente; también los tipos coloreados translúcidos y opacos.

Propiedades mecánicas: dependen en gran manera del tipo y porcentaje de plastificante y cargas. En general la diferenciación se realiza con la dureza Shore A. Uso en la zona "elástica", es decir, por encima de la temperatura de congelación. Flexibles, blandos; mejor amortiguación de vibraciones pero mayor tendencia al flujo en frío que el caucho blando. Poca resistencia al desgarro inicial; buena resistencia a la abrasión.

Propiedades eléctricas: aislamiento eléctrico peor que el PVC rígido; resistencia superficial sólo moderada y resistencia transversal media. Pérdida dieléctrica elevada. Poca acumulación de cargas electrostáticas.

Propiedades térmicas: el aumento de temperatura implica una disminución acusada de la resistencia mecánica y de la dureza. Si son pequeños los esfuerzos a soportar, son utilizables hasta +60 ºC, con algunos plastificantes especiales hasta +105 ºC. Según los plastificantes y su porcentaje, la fragilidad se produce en la zona de -10 a -50 ºC. Normalmente son inflamables, debido al plastificante.

Resistencia química: menor que la del PVC rígido.

Resiste a: con un porcentaje medio de plastificantes de calidad es resistente a soluciones salinas, ácidos inorgánicos de concentración media; algunos PVC - P resisten a la bencina, aceite, alcohol. Resisten, con reservas, a álcalis. Buena resistencia a la luz y al envejecimiento; posibles alteraciones por exudación de plastificante.



No resiste a (selección): disolventes orgánicos y soluciones acuosas que extraen el plastificante (cuarteamiento), benceno. Basta la temperatura normal para que algunos plastificantes afloren a la superficie o migren a otros plásticos o sustancias contiguas (los plastificantes poliméricos son mejores en este aspecto).

Propiedades fisiológicas: sólo algunos plastificantes determinados están autorizados para contacto con alimentos juguetería infantil o vestuario (ley de alimentos).

- **Ejemplos de aplicación:**

Fabricación de aparatos: recubrimientos, revestimientos, tubos flexibles, tuberías, juntas, depósitos, asas.

Construcción: juntas de ventanas y puertas; suelo sintético, rebordes; mangueras de jardín, láminas de protección, revestimiento de piscinas, láminas para tejado, puertas plegables tipo fuelle, puertas transparentes de movimiento pendular; forro de alambre.

Electrotecnia: aislamientos para baja frecuencia, encamisado de cables, boquillas, enchufes, tubos flexibles retráctales, cinta aislante.

Agricultura: láminas para silos, láminas de protección de cultivos, mangueras.

Industria del mueble: tapizado de cuero artificial, listones para rebordes, perfiles y láminas decorativos.

Industria del juguete: muñecas, animales para piscina, botes hinchables, balones.

Alimentación: bandas transportadoras, tubo flexible transparente para bebidas.

Diversos: suelas de calzado, sandalias, zapatillas de baño, botas, chanclos; guantes de protección laboral; maletas, bolsas de mano; gabardinas; cortinas, hules; ventanas flexibles; tanques transportables; tapas de libro, artículos de oficina; recubrimiento de tejidos; láminas autoadhesivas; bocas de aspiración, elementos de amortiguación; trajes de protección; material espumado.



Polímeros de Estireno

Los polímeros de estireno forman parte, junto con las poliolefinas y los poli(cloruros de vinilo), del grupo de los plásticos de uso masivo. Las múltiples posibilidades de interacción entre los distintos componentes (estireno, butadieno, acrilonitrilo, etc.) que pueden intervenir la estructura del polímero permiten fabricar plásticos con un ámplio abanico de propiedades, ajustándolas a los más variados sectores de aplicación.



Juguete fabricado con polímero de estireno

En concreto, el abanico se extiende desde el poliestireno PS quebradizo hasta plásticos con mejor comportamiento en resistencia a la tracción, rigidez, resistencia al impacto. En los múltiples campos de aplicación de los polímeros de estireno desempeñan también un papel decisivo la transformación económica y la buena calidad superficial. Los plásticos de ABS tienen una importancia particular como materiales para carcasa, con características muy variadas. Son también los materiales más importantes para el tratamiento galvánico de las superficies (cromado).

Subdivisión de los polímeros de estireno:

- Poliestireno (PS)

- Poliestireno alto impacto, estireno-butadieno (SB).Poliestireno resistente al impacto, modificado con caucho. Es un copolíemro de estireno y butadieno o bien una mezcla de polímeros (blend) compuesta por poliestireno y polibitadieno o bien otros elastómeros.

- Copolímero de estireno - acrilonitrilo (SAN). Poliestireno modificado con mejor resistencia mecánica, rigidez y estabilidad al choque térmico. Es un copolímero de estireno y acrilonitrilo.

- Polímeros de acrilonitrilo - butadieno - estireno (ABS). Poliestireno modificado, compuesto por estireno, acrilonitrilo y butadieno, con buen nivel mecánico y elevada reistencia al impacto. Los copolímeros de estireno, acrilonitrilo y butadieno se fabrican utilizando diversos métodos, por ejemplo, la polimerización por injerto. Las mezclas de polímeros (blends) también son posibles partiendo de SAN y caucho de butadieno-acrilonitrilo.



Poliestireno(PE)

- **La estructura del poliestireno:**

- **Propiedades:**

Densidad: 1,05 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos amorfos con poca absorción de humedad.

Material de refuerzo: fibras de vidrio (raramente).

Color: transparente con alto brillo superficial; se puede colorear en todos los tonos, en traslúcido y opaco, también anacarado.

Propiedades mecánicas: rígido, duro, quebradizo, muy sensible al impacto y a la entalla. Poca tendencia al flujo en frío.

Propiedades eléctricas: buena resistencia eléctrica, casi independiente de la humedad absorbida; no obstante, la humedad superficial influye en las propiedades eléctricas. Buenas características dieléctricas, casi independientes de la frecuencia. Se carga electrostáticamente, por lo cual a menudo se le añaden aditivos antiestáticos.

Propiedades ópticas: es apropiado para fines ópticos de importancia secundaria, dentro de interiores. En uso exterior, se pierde brillo superficial y amarillea.

Propiedades térmicas: uso hasta 70 ºC, tipos estables al calor hasta 80 ºC. Arde bien, con llama que genera humo denso, sin gotear.

Es resistente a: ácidos inorgánicos concentrados y diluidos (a excepción de los ácidos oxidantes), álcalis, alcoholes (a excepción de alcoholes de peso molecular elevado), agua; bastante resistente al envejecimiento.

No es resistente a: disolventes orgánicos tales como bencina, cetonas (acetona); hidrocarburos aromáticos (benceno), clorados; aceites etéreos; es sensible a rayos UltraVioleta (por ello existen algunos tipos estabilizados a los UV).

Propiedades fisiológicas: inocuo.

- **Ejemplos de aplicación:**



Industria del envase: envases de gran brillo superficial y transparencia, por ej. para productos cosméticos, artículos de consumo, de escritorio, envases de alimentos en porciones.

Iluminación: luminarias de todo tipo (con efecto de cristal), pero sólo para interiores.

Mecánica fina y electrotecnia: mirillas, carretes para cintas magnetofónicas y cinematográficas, láminas aislantes, partes de relés, marcos de diapositivas.

Diversos: archivadores y contenedores para el hogar, el taller y el ocio; estuches; jeringuillas desechables; juguetes sencillos; cubiertos y vajillas desechables; bisutería; peines, cepillos de dientes; objetos domésticos tales como fuentes, vasos, tapa de tartas, cortador de huevos.

Las láminas de EPS se utilizan para envases y láminas de aislamiento térmico.



Poliestireno alto impacto, estireno - butadieno(SB)

Estructura del poliestireno de alto impacto:

Propiedades:

Densidad: 1,04 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos amorfos, con mayor absorción de humedad que el PS. El poliestireno de alto impacto se fabrica como copolímero de estireno y butadieno (S / B), o bien como mezcla de poliestireno y caucho de butadieno.

Color: la presencia de butadieno hace que se pierda la transparencia y el plástico se hace turbio o incluso opaco; se puede colorear sólo con colores cubrientes. Si la modificación se hace con elastómeros especiales, se pueden fabricar incluso tipos SB transparentes.

Propiedades mecánicas: resistente al impacto y al choque, resistencia mecánica, menor sensibilidad a la entalla; por lo tanto, puede utilizarse para insertar piezas metálicas.

Propiedades eléctricas: buenas; pérdidas dieléctricas bajas, pero en algunos casos algo superiores a las del PS. Fuerte carga electrostática, por lo cual se suele recurrir a aditivos antiestáticos.

Propiedades térmicas: uso hasta 75 ºC; gracias al componente caucho, hasta temperaturas de -40 ºC.

Es resistente a: es menos resistente que el PS; resiste con limitaciones a ácidos y álcalis. El componente butadieno lo hace más sensible al envejecimiento que el PS.

No resiste a: igual que el PS; sensible a los rayos UV.

Propiedades fisiológicas: en determinadas formulaciones es inocuo.

Ejemplos de aplicación:



Piezas técnicas con buena resistencia mecánica y brillo superficial.

Mecánica fina y electrotecnia: carcasas de aparatos de radio, televisión, magnetófonos, vídeos, cámaras fotográficas y filmadoras. Bobinas; cassettes de video y cine.

Electrodomésticos: carcasas; paredes interiores, revestimiento de puertas y tapas de frigoríficos; vajilla desechable; vasos; artículos de baño; cajones; muebles pequeños; perchas.

Diversos: juguetes; envases de todo tipo; cajas apilables; marcos de diapositivas; tacones, hormas; láminas para envases termoconformados.



Copolímero de estireno - acrilonitrilo (SAN)

- **Estructura del Copolímero de estireno-acrilonitrilo:**

- **Propiedades:**

Densidad: 1,08 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos amorfos, mayor absorción de humedad que el PS.

Material de refuerzo: fibras de vidrio.

Color: transparente con gran brillo superficial; se puede colorear en cualquier color translúcido u opaco.

Propiedades mecánicas: rígido; mayor resistencia al impacto que el PS, pero menor que el SB. El mayor módulo de elasticidad de todos los polímeros derivados de estireno. Mayor resistencia al rayado, gran dureza superficial. Buena resistencia a largo plazo. Las fibras de vidrio permiten aumentar sustancialmente la resistencia mecánica y el módulo de elasticidad.

Propiedades eléctricas: muy buenas; pérdidas dieléctricas algo mayores que el PS, pero con menor dependencia de la frecuencia o de la temperatura.

Propiedades ópticas: similares a las del PS estándar.

Propiedades térmicas: uso hasta 95 ºC. Buena tolerancia de cambios térmicos.

Es resistente a: mejor que el PS estándar, sobre todo frente a medios no polares como bencina, aceite y productos aromáticos. Si aumenta el contenido en acrilonitrilo, aumenta también la resistencia.

No resiste a: igual que el poliestireno estándar; evítense los rayos UV.

Propiedades fisiológicas: inocuo.

- **Ejemplos de aplicación:**



Piezas técnicas de calidad con gran rigidez y estabilidad dimensional, cuando se pida también transparencia.

Mecánica fina, electrotecnia: piezas de carcasa para filmadoras, grabadoras vídeo y máquinas de oficina; pulsadores; cuadrantes; mirillas; pantallas visuales; carcasas de baterías de arranque; bobinas para cintas cinematográficas y magnetofónicas; aparatos de teléfono; tambores de contador.

Electrodomésticos: piezas de carcasa, cuadrantes, pulsadores; piezas de vajillas.

Diversos: envases de alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos; complementos de baño; carcasa de reflectores; triángulos de aviso de estacionamiento.



Polímeros de acrilonitrilo - butadieno - estireno (ABS)

Estructura de los Polímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno:

Propiedades:

Densidad: 1,03 - 1,07 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos amorfos con grandes posibilidades de variación en cuanto a estructura. Se distingue entre:
Mezclas de polímeros (blends) formadas por ejemplo por caucho de butadieno repartido de forma fina y homogénea dentro de una masa de SAN.
Copolímeros del tipo injerto o terpolímeros, p.ej. SAN con caucho de butadieno o de butadieno-acrilato. El elastómero se halla unido químicamente a la macromolécula de SAN. Poca absorción de humedad.
Aparte de los polímeros de ABS puro, existen otras mezclas de polímeros: ABS con PVC, ABS con PC o ABS con PA. Las propiedades finales del polímero mezcla dependen de la relación de mezclado de los componentes iniciales.

Material de refuerzo: fibras de vidrio, esferillas de vidrio.

Color: debido al caucho por lo general no son translúcidos, sino blancoamarillentos; cualquier color es posible en opaco. En los polímeros de injerto, el brillo superficial es muy elevado; con mezclas de polímeros se pueden conseguir superficies más mates. Existen tipos especiales transparentes.

Propiedades mecánicas: rigidez, resistencia mecánica, incluso a temperaturas bajas, hasta -45 ºC. Gran resistencia al impacto normal y con probeta entallada. Buena atenuación acústica debido a su elevada amortiguación mecánica. Su buena resistencia mecánica los hace idóneos para recibir insertos metálicos. Con fibras de vidrio se puede aumentar la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad, pero se reduce su resistencia al impacto.

Propiedades eléctricas: resistencia superficial y transversal elevadas, cargas electrostáticas muy reducidas. Pérdidas dieléctricas mayores que para el poliestireno PS estándar.

Propiedades térmicas: buena estabilidad al calor, uso posible entre -45 y +85 ºC; algunos tipos especiales hasta 100 ºC e incluso más.

Resistencia química: similar a la del SAN, según los porcentajes de los tres componentes, estireno, acrilonitrilo y butadieno, pueden darse algunas diferencias. Agua, soluciones salinas acuosas, ácidos y álcalis diluidos, hidrocarburos saturados (gasolina), aceites minerales; grasas animales y vegetales. La resistencia al envejecimiento es suficiente en tipos con negro de humo.



No resisten a: ácidos inorgánicos concentrados; hidrocarburos aromáticos (bencénicos) y clorados, ésteres, éteres y cetonas.

Propiedades fisiológicas: inocuo.

- **Ejemplos de aplicación:**

Mecánica fina y electrotecnia: carcasas y pulsadores en aparatos de radio, televisores, vídeos y alta fidelidad, filmadoras y cámaras fotográficas, teléfonos, máquinas de oficina, relojes, lámparas.

Automoción: piezas de carrocería, tableros de abordo, listones decorativos cromados, botiquines, caja para la batería, revestido del árbol de la dirección, consolas centrales, guanteras, apoyabrazos, rejillas delanteras, spoilers.

Industria del mueble: sillas para adultos y niños, respaldos, taburetes, elementos de armario, herrajes.

Electrodomésticos: carcasas de aspiradora, máquinas de cocina; pulsadores.

Diversos: juguete técnico, juguetes de piezas ensamblables, maletas, tacones, cascos de bote, material sanitario como tuberías y codos, cascos de motorista; contenedores.



Poli(metacrilato de metilo) (PMMA)

Los poli(metracrilatos de metilo) del mercado son el PMMA de colada, normalmente de peso molecular elevado (semifabricado), y las masas de moldeo de PMMA homopolímero, normalmente de peso molecular mas bajo, que se puede inyectar y extruir; existen además copolímeros con un 80 % como mínimo de metacrilato de metilo (MMA). Los copolímeros que contienen hasta un 50 % de acrilonitrilo (AMMA) tienen mejor resistencia química y mecánica, sobre todo tenacidad, pero sólo se comercializan como semifabricados. Otros copolímeros se fabrican a partir de MMA, butadieno y estireno (MBS), caracterizándose por su gran resistencia al impacto y transparencia elevada.

Los materiales de moldeo modificados con ésteres de ácido acrílico poseen una buena resistencia a la intemperie.

En el mercado se encuentran también mezclas, por ej. (PMMA + PC) y (PMMA + PVC) con mayor resistencia al impacto y menor sensibilidad a la entalla.

Estructura del poli(metacrilato de metilo) (PMMA):

$$\left[-CH_2-C(CH_3)(COOCH_3)- \right]_n$$

Propiedades:

Densidad: PMMA 1,19 g / cm^3; AMMA 1,17 g / cm^3; MBS 1,11 g / cm^3.

Estructura: termoplásticos amorfos con poca absorción de agua y humedad. Los productos polimerizados como semifabricados son los que presentan menos ráfagas y tienen mayor calidad.

Color: transparencia cristalina con brillo superficial elevado; se pueden colorear en cualquier color, tanto en transparente como en opaco. El AMMA tiene un color natural algo amarillento.

Propiedades mecánicas: duros y rígidos, pero frágiles. Buena resistencia a la tracción, compresión y flexión, con poca capacidad de deformación (a excepción de la compresión). Buena resistencia al rayado.

Propiedades eléctricas: buena resistencia superficial, buena resistencia a las corrientes parasitarias. Carga electrostática.

Propiedades ópticas: gran calidad óptica (cristal orgánico), el PMMA no tiene coloración propia; transmisión luminosa elevada, hasta el 92 %; índice de refracción: 1,492 para el PMMA, 1,508 para el AMMA con coloración propia ligeramente amarillenta. Las superficies de corte se pueden pulir.



Propiedades térmicas: la temperatura de uso máxima es de 70 ºC, en tipos especiales (calóricos) puede llegar hasta 100 ºC; buena resistencia al cambio térmico, incluso a temperaturas bajas.

Resistencia a: hidrocarburos alifáticos, disolventes no polares, ácidos y álcalis en solución acuosa; grasas; alcohol en concentraciones inferiores al 30 %. Buena resistencia a la luz, envejecimiento e intemperie. El AMMA resiste además a los hidrocarburos clorados.

No resisten a: disolventes polares, como son los hidrocarburos clorados, alcohol en concentración superior al 30 %, gasolina que contenga benceno, alcohol etílico, lacas nitro y disoluciones de nitrocelulosa; ácidos concentrados; ciertos plastificantes.

Propiedades fisiológicas: inocuo.

Ejemplos de aplicación:

Óptica: cristales de gafa (menor peso que el vidrio, menor peligro de astillamiento), vidrios de reloj, lupas, lentes, prismas, vidrios difusores, fibras conductoras de luz.

Vajilla: fuentes, vasos, cubiertos, carcasas.

Electrotecnia: piezas de conmutación, pulsadores, tapas, reglas graduadas, capuchones de piloto, paneles luminosos, bandas luminosas. Almacenaje óptico de datos informáticos.

Automoción: pilotos traseros, intermitentes, tapas de tacómetro, prismas para captadióptricos traseros y triángulo de peligro. Acristalado de vehículos y aviones.

Máquinas de oficina: instrumentos de dibujo y objetos de escritorio, plumas estilográficas.

Industria de la construcción: techos acristalados, claraboyas, planchas segmentadas dobles y triples para cubiertas de invernadero. Partes de instalaciones sanitarias, como son bañeras y platos de ducha, picas, acristalado de duchas; celdas sanitarias; botones de grifería. Muebles y piezas para mobiliario. Tuberías transparentes.

Modelos y publicidad: modelos de demostración, artículos luminosos para publicidad y propaganda, varillas luminosas, láminas transparentes; paneles indicadores para tráfico y señalización; bisutería; material para inclusiones vistosas.

Diversos: tapas de seguridad para máquinas, aparatos y armarios eléctricos. Aplicaciones ortopédicas. Prótesis dentales.



Poliamidas

Las poliamidas poseen buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto; tienen buen comportamiento al deslizamiento y buena resistencia al desgaste. Por ello, son apropiadas como plásticos de ingeniería para muchas aplicaciones técnicas. La masa fundida fluye con facilidad, lo cual permite fabricar piezas moldeadas de gran complejidad. Sin embargo, en el caso de las poliamidas hay que tener en cuenta que absorben y despiden humedad (de forma reversible), lo cual implica una alteración de sus propiedades.

- Se distingue entre las poliamidas siguientes:

Semicristalinas	
poliamida 6	PA6
poliamida 46	PA46
poliamida 66	PA66
poliamida 610	PA610
poliamida 612	PA612
poliamida 11	PA11
poliamida 12	PA12
Amorfas, transparentes	
Copoliamidas	
Poliamida 6-3-T	

- **Estructura:** las poliamidas pueden estar compuestas por un solo elemento de partida (eslabón que se repite), por ejemplo la e-caprolactama en el caso de la PA6. Se nombran con una cifra que indica el número de átomos de carbono del elemento de partida. Responden a la fórmula general siguiente:

$$\left[-\underset{}{\overset{H}{\overset{|}{N}}} - (CH_2)_x - \underset{\underset{O}{\|}}{C} - \right]_{n_1}$$

Para la PA6 (x = 5), la PA11 (x = 10) y la PA12 (x = 11).

Otras poliamidas se componen de dos elementos distintos de partida (eslabones), que por policondensación dan lugar a grupos dentro de la cadena. En este caso se nombran indicando el número de átomos de carbono de ambos elementos; primero se indican los átomos de carbono de la diamina, 6 o 4, y luego los de carbono del componente ácido. Responden a la fórmula general:

$$\left[-\overset{H}{\overset{|}{N}} - (CH_2)_6 - \overset{H}{\overset{|}{N}} - \underset{\underset{O}{\|}}{C} - (CH_2)_y - \underset{\underset{O}{\|}}{C} - \right]_{n_2}$$



Entre ellas están la PA66 (y = 4), la PA610 (y = 8) y la PA612 (y = 10). La PA 6-3-T no se enmarca en este esquema.

Propiedades:

Densidad: PA6: 1,12 a 1,14 g / cm^3;; PA46: 1,18 g / cm^3;; PA66: 1,12 a 1,14 g / cm^3;; PA610: 1,06 a 1,08 g / cm^3;; PA11: 1,04 g / cm^3;; PAl2: 1,01 a 1,02 g / cm^3;; PA6-3-T: 1,06 a 1,12 g / cm^3;.

Estructura: termoplásticos semicristalinos con una cristalinidad no superior al 60 %; la cristalización es mejor con agentes nucleizadores, lográndose estructura esferolítica fina. Según los tipos (en especial la PA6 y la PA66), la absorción de humedad puede ser intensa; más en las zonas amorfas que en las cristalinas.

Termoplásticos **amorfos** los de estructura correspondiente, por ejemplo PA6 - 3 - T. Para mejorar determinadas propiedades se fabrican mezclas de poliamida con otros materiales, por ejemplo (PA + PE), (PA + PTFE).
Algunas poliamidas llevan plastificantes (por ej. la PA11).

Materiales de refuerzo y carga: fibras de vidrio, incluso largas; fibras de carbono, esferillas de vidrio, cargas minerales, creta, lubricantes como el MoS^2; y el grafito.

Color: color natural lechoso opaco; se pueden colorear en cualquier tono opaco. Las poliamidas amorfas son casi transparentes.

Propiedades mecánicas: dependen del tipo, de la cristalinidad y del contenido en agua. Si aumenta la cristalinidad, se hacen rígidas y duras; después de haber absorbido agua, son muy tenaces. Si se someten a estiraje, se aumenta la resistencia (cables, bandas). Gran resistencia a la fatiga, buena resistencia al impacto normal y con probeta entallada. Resistente a la abrasión; buen deslizamiento, que se mejora con MoS_2, PTFE o grafito. La resistencia mecánica y el módulo de elasticidad se mejoran con fibras de vidrio o de carbono, con lo cual se reduce la contracción y se mejora la resistencia a la deformación por calor. Existen poliamidas modificadas, con resistencia muy elevada al impacto, con y sin probeta entallada.

Propiedades eléctricas: éstas dependen del contenido en agua. La buena resistencia superficial impide en gran parte las cargas electrostáticas. No son apropiadas para aislamiento en la región HF, por sus pérdidas dieléctricas, debidas a la polaridad; es posible su uso en la región de bajas frecuencias. Buena resistencia a las corrientes de fuga.

Propiedades térmicas: la temperatura máxima de uso, según tipos, oscila de 80 a 120 ºC; por breve tiempo, puede alcanzar hasta 140 ºC; en tipos reforzados con fibra de vidrio puede ser incluso más alta, al igual que la PA46 que resiste hasta 130 ºC a largo plazo. La mayoría resisten el agua hirviendo y se pueden esterilizar. Zona de reblandecimiento estrecha. Temperatura mínima de uso hasta -40 ºC, en algunos casos hasta -70 ºC.
Zonas de fusión de cristalizas PA 46: 295 ºC; PA 6: 215 a 225 ºC; PA 66: 250 a 265 ºC; PA 610: 210 a 225 ºC; PA11: 180 a 190 ºC; PA12: 175 a 185 ºC.

Resistencia a: hidrocarburos alifáticos y aromáticos, gasolina, aceites, grasas; algunos alcoholes, ésteres, cetonas, éteres, muchos hidrocarburos clorados; álcalis débiles. Los tipos de cristalinidad elevada tienen mayor resistencia. Los tipos estabilizados al efecto son resistentes al envejecimiento y a la intemperie, punto importante en piezas de pared delgada.

No resisten a: ácidos inorgánicos, álcalis fuertes, soluciones de compuestos oxidantes; ácido fórmico; fenoles, cresoles, glicoles; cloroformo. La PA amorfa no resiste al alcohol etílico, a la acetona ni al diclorometano.



Propiedades fisiológicas: bajo la acción prolongada del calor, el contacto con alimentos acuosos puede ser nocivo (a excepción de la PA11 y PA12). Los tipos que contienen plastificantes no son aptos para aplicaciones alimentarias.

Absorción de agua: es un proceso lento en clima normal. Las varillas planas de PA6 mantenidas en clima normal 23 / 50 durante 4 meses alcanzan un contenido de agua del 2,3 % (todavía sin saturar). Las piezas inyectadas, secas, normalmente se acondicionan por ejemplo por inmersión en agua, para que alcancen el nivel de agua que necesitan para el uso, controlándose la diferencia de peso entre estado húmedo y estado seco.

Ejemplos de aplicación:

Maquinaria, mecánica fina: ruedas dentadas, poleas de transmisión, elementos de embrague, discos de maniobra, discos de levas, rodillos, jaulas para rodamientos de cilindros, rodamientos de fricción, hélices, cadenas de transporte, juntas, recubrimientos.

Automoción: aspas de ventilador, filtros de aceite, piñón de ataque (accionamiento); tubos de aspiración; cárter de aceite; boquillas para limpiaparabrisas, casquillo de cojinete, elementos de deslizamiento; piezas exteriores como carcasa de retrovisor, tapacubos, rejilla de radiador; hélices de barco; tuberías; cascos para motorista.

Electrotecnia: bobinas, enchufes, cajas de distribución, carcasas de motor, placas de cojinete, carcasas de herramientas eléctricas, aspiradoras de polvo, linternas de mano, cubiertas de cable resistentes a la abrasión.

Material sanitario: carcasas de bombas, grifos de agua, grifos mezcladores.

Industria de la construcción y del mueble: herrajes, bisagras, pernos; plataformas para asiento y respaldos, incluso para uso exterior; cadenas de cierre; mueble de jardín con recubrimiento protector; tacos para pared; recubrimientos; regletas de aislamiento térmico para ventanas de aluminio.

Diversos: piezas encajables en juguetes didácticos; instrumental quirúrgico y materiales de costura; sedales; láminas de envasado, tripa sintética para envasar embutidos; fibras, cables, cerdas para brochas, bandas; cartuchos de correo neumático; piezas de fijación de esquí.



Poliesteres lineales (Poli(tereftalatos de alquileno)) PET, PBT.

Los poliésteres saturados lineales son termoplásticos y pueden transformarse como tales por los sistemas habituales. Son materiales de ingeniería y se utilizan especialmente siempre que se requiera buena estabilidad dimensional y resistencia a largo plazo. Sus propiedades más interesantes son el deslizamiento, la resistencia al desgaste y sus propiedades térmicas.

En la práctica se utilizan sobre todo el poli(tereftalato de etileno) PET y el poli(tereftalato de butileno) PBT, que poseen propiedades térmicas muy buenas.

Estructura:

$$\left[-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-C_6H_4-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-(CH_2)_2-O- \right]_n$$ PET

$$\left[-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-C_6H_4-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-(CH_2)_4-O- \right]_n$$ PBT

Propiedades:

Densidad: PET cristalino 1,38 g / cm^3;, amorfo 1,33 g / cm^3;; PBT 1,30 g / cm^3;.

Estructura: el PET, por su velocidad lenta de cristalización, en función del tipo y de las condiciones de inyección, puede tener estado amorfo-transparente o semicristalino, con un 30 a un 40 % de cristalinidad. Si la temperatura del molde no supera los 40 ºC, se obtiene estructura amorfa; si la temperatura es mayor, llegando incluso a 140 ºC, la estructura obtenida es semicristalina. El grado de cristalización puede aumentarse agregando productos nucleizadores.

El PBT es un termoplástico **semicristalino**. Tanto el PET como el PBT absorben muy poca humedad.

Mezclas de polímeros (polyblends):
La mezcla (PBT + PC) posee una resistencia química mucho mayor. Últimamente se han desarrollado mezclas de PBT y caucho butadiénico con resistencia excelente al impacto. Con una estructura distinta, pero similar, se fabrican los elastómeros de poliéster termoplásticos que, sin vulcanizar, poseen propiedades muy parecidas a las del caucho. Materiales de refuerzo y carga para PET y PBT: fibras de vidrio, esferillas de vidrio, cargas minerales, talco, fibras de carbono y aramida; esteras de fibra de vidrio para reforzar termoplásticos.

Color: el PET en estado amorfo es transparente, en estado semicristalino es opaco y blanco; el PBT, por su mayor cristalinidad, es opaco y blanco. Presentan buen brillo superficial, se pueden colorear en cualquier color opaco; las láminas de PET y de PBT son transparentes.



Propiedades mecánicas: el PET ~ semicristalino tiene dureza, rigidez y resistencia elevadas con buena tenacidad, incluso a -30 ºC. Buena resistencia a largo plazo. Muy baja abrasión y buen deslizamiento.
El PET amorfo se comporta como el semicristalino, pero con menor dureza y rigidez. El PBT no tiene un conjunto de propiedades tan bueno como el PET, pero se inyecta con una facilidad mucho mayor. Tiene muy buena tenacidad, incluso a bajas temperaturas. Para mejorar sus propiedades mecánicas, el PET y el PBT se refuerzan con fibras de vidrio. La repercusión de este refuerzo sobre el deslizamiento es poco importante.

Propiedades eléctricas: buen aislamiento, elevada rigidez dieléctrica, sin apenas influencia de la humedad del aire. Buen comportamiento dieléctrico.

Propiedades térmicas: el PET semicristalino tiene muy buena resistencia al calor; su temperatura de uso es de -30 a + 110 ºC, por poco tiempo incluso por encima; en estado amorfo, la resistencia al calor es menor.
A temperaturas altas, el PET amorfo puede enturbiarse por cristalización incipiente.
El PBT tiene buena resistencia al calor; su temperatura de uso es de -50 a + 120 ºC; en tipos reforzados puede llegar hasta 200 ºC. No tiende al amarilleo. Su dilatación térmica lineal es muy reducida.
Margen de fusión de cristalitas: en el PET cristalino es de 255 a 258 ºC; en el PBT, 220 a 225 ºC.

Resistencia a: hidrocarburos alifáticos y aromáticos (algunos PBT no); aceites, grasas, carburantes. Ésteres alifáticos superiores, soluciones acuosas de sales, bases y ácidos.

No resisten a: agua hirviente y vapor; acetona; hidrocarburos halogenados como cloroformo, diclorometano; ácidos y álcalis concentrados.

Propiedades fisiológicas: normalmente inocuos.

Ejemplos de aplicación:

Piezas técnicas, funcionales, de dimensiones estables, con buen deslizamiento, poco desgaste y buena resistencia a la temperatura.

Mecánica fina, electrotecnia: elementos deslizantes, discos de levas y de control, ruedas dentadas; carretes de bobinas, regletas de enchufe, pulsadores, conmutadores; carcasas de reloj de pulsera; zócalos de lámpara.

Maquinaria: rodamientos de fricción, guías, ruedas dentadas, embragues.

Electrodomésticos: carcasas y asas de planchas, asadores, barquilleros, infrarrojos, tostadores de pan, quemador de "fondue", partes de bombas, válvulas, instalaciones.

Automoción: carcasa de pilotos, zócalos de lámparas, partes de espejo retrovisor, sistemas de parachoques pintables (sobre todo de PBT modificado con elastómero).

Diversos: bisagras, rodillos, herrajes, carriles, palancas, asas; láminas para envases esterilizables y rellenables en caliente; bandejas de restaurantes autoservicio; botellas transparentes de PET para bebidas.

Láminas de PET: cintas de vídeo y de audio, diskettes para informática "floppy-disk"), láminas grabadas; láminas difusoras; láminas de condensador metalizadas en vacío; láminas de aislamiento; láminas de envase.



Marcas comerciales de materiales termoplásticos

	PE	PP	PVC	PMMA	PS	SAN	ABS	PC	PET	PBT	PA6,6	PA6	POM
Ticona (Hoescht)	Hostalen G.	Hostalen PP Hostacom	Hostalit		Hostyren				Impet Polyclear	Celanex Hostadur	Fosta nylon Celanese nylon		Kematal Hostaform
Repsol	Alcudia	Isplen											
Basf	Lupolen	Novolen	Vinidur Vinoflex	Lucryl	Polystyrol Styrolux	Luran	Terluran		Ultralen	Ultradur	Ultramid A	Ultramid B	Ultraform
British Pretoleum (BP)	Innovex Rigidex Novex	Napryl	Breon		Lustrex								
Dow Chemical	Dowlex Dow PE				Styron	Tyril Magnum	Tybrene Magnum	Calibre					
Bayer	Baylon					Novodur W	Novodur	Makrolon Andoran Makrisol	Petlon	Pocan	Durethan A	Durethan B	
DuPont	Alathon Sclair		Elvax	Elvacite Lucite					Rynite		Minlon Zytel	Zytel	Delrin
Atochem	Lacqtene Butene	Lacqtene P Appryl	Lucorex Lucolene Lacquyl	Vedril	Lacqrene	Lacqsan Lacqrene	Lacqran	Orgalon Durolon		Orgater	Orgamide Rilsan	Orgamide	
Esso	Escorene												
Shell	Carlona	Carlona P Shell PP	Carina Shell PVC		Carinex Duratlnon								
ICI	Alkathene	Propathene Procom	Welvic Coivic	Diakon Asterite					Melinite		Maranyl A Verlon	Maranyl F	
General Electric (GE)							Cycolac Cycopac	Lexan		Valox Enduran			
Ciba Geigy		Procon							Crastin	Crastine	Veratil	Veratil	
DSM	Stamylan Stamylex Teamex	Stamylan P	Varlon				Ronfalin	Xantar	Arnite A	Arnite I	Akulon	Akulon	

Mezclas:

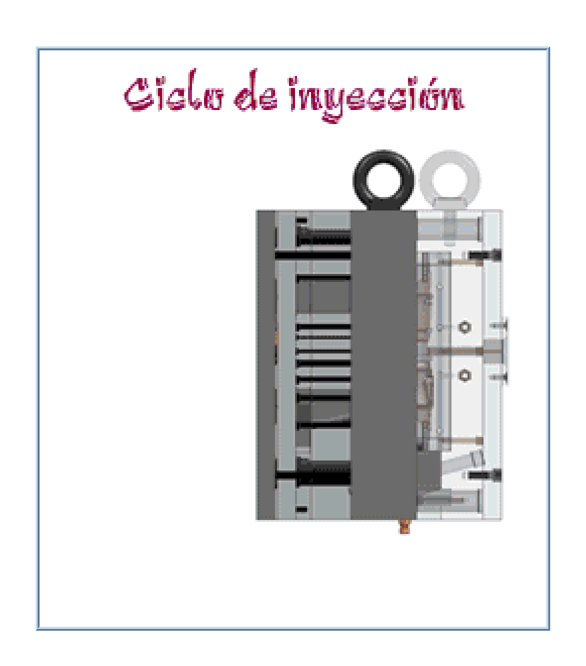
ABS/PA: Triax (Monsanto)
ABS/PVC: Cycovin (GE), Ronfaloy (DSM)
ABS/PC: Bayblend T (Bayer)

PC/PBT: Makroblend PR (Bayer), Ultrabend (BASF), Xenoy (GE)
PPE/PS: Noryl (GE), Xyron (Dow)
PPE/SB: Luranyl (Basf)
PPE/PA: Noryl GTX (GE), Ultranyl (Basf)



Introducción

El proceso de moldeo por inyección de termoplásticos tiene una gran importancia en la actualidad. Junto con la extrusión supone el 80% aproximadamente del consumo mundial de termoplásticos y en cuanto al número de máquinas existentes es el proceso más importante. Es un proceso cíclico, adaptado sólo a la fabricación de grandes series, ya que de otra forma es económicamente inviable debido al alto costo de los equipamientos y de los moldes.



Características del moldeo por inyección

- Se pueden fabricar piezas con una cadencia muy alta.
- Los costes de mano de obra por pieza fabricada son relativamente bajos (alto grado de automatización).
- Elevado nivel de competencia. Es casi siempre necesario trabajar a tres relevos para la amortización de máquinas, moldes y equipos auxiliares.
- Los moldes, maquinaria y equipos auxiliares son caros.





El ciclo de inyección

Un ciclo de inyección consta de las siguientes etapas:

1.- Cerrar el molde.

2.- Unidad de inyección adelante hasta contactar con el molde.

3.- Inyección. El husillo inyecta el plástico fundido dentro del molde.

4.- Mantenimiento. Tras llenar el molde se sigue ejerciendo presión con el husillo para compensar el efecto de la contracción térmica.

5.- Plastificación y dosificación. El husillo gira y transporta material hacia delante. El volumen creciente de material acumulado en la punta le obliga a retroceder.

6.- Unidad de inyección atrás.

7.- Abrir el molde y expulsar pieza.

En forma de esquema las fases del ciclo de inyección:



Ejemplos del ciclo de inyección de materiales semicristalinos y amorfos



Operaciones del Husillo durante el ciclo

Aunque ya se han descrito de forma general las diferentes etapas que conforman el ciclo de inyección, resulta necesario extenderse en más profundidad en lo que respecta a la unidad de inyección.

El material se transfiere del cilindro al molde en dos etapas, denominadas 1ª fase o llenado y 2ª fase o mantenimiento. A continuación, se recogen las fases más importantes:

- 1ª fase o llenado
- 2ª fase o mantenimiento
- Plastificación



1ª fase.

En esta fase se transfiere al molde la cantidad de material suficiente para su llenado volumétrico (del 95 al 98 % del volumen de la cavidad del molde o pieza a fabricar). Este volumen se denomina dosis y debe ser programado en los controles de la máquina. La dosis se transfiere controlando la velocidad a la que se introduce (se programa la velocidad de avance del husillo). También se programa una presión límite de inyección, que no se debe confundir con la que en realidad emplea la máquina. La presión necesaria va aumentando progresivamente desde cero hasta un valor máximo, que se alcanza al terminar de introducir la dosis.



En principio la inyección de material debe ser realizada lo más rápidamente posible para asegurar unas líneas de soldadura resistentes, y mejor calidad superficial. Como contrapartida, en una inyección rápida existe la posibilidad de que se produzca jetting o chorro libre y marcas de quemado. En las máquinas modernas estos defectos se pueden minimizar programando una velocidad de inyección variable (perfil de velocidades).



2ª Fase o mantenimiento

Los objetivos de esta fase son introducir dentro del molde material adicional para compensar la contracción volumétrica debida al enfriamiento, y evitar que el material en la cavidad retroceda hacia atrás debido a la ausencia de presión. Durante esta fase lo que se controla es la presión que ejerce sobre el husillo, y el tiempo durante el cual se ejerce dicha presión. A la presión se le denomina presión de mantenimiento o de segunda fase y al tiempo durante el que se ejerce se le denomina tiempo de mantenimiento de presión (TMP).

Al final de esta fase, siempre debe quedar cierta cantidad de material en la punta del husillo (alrededor de un 5 % de la cantidad máxima que puede plastificar la máquina), denominado cojín o colchón. Este material asegura que se ha podido transmitir la presión de mantenimiento al material dentro de la cavidad durante todo el TMP.



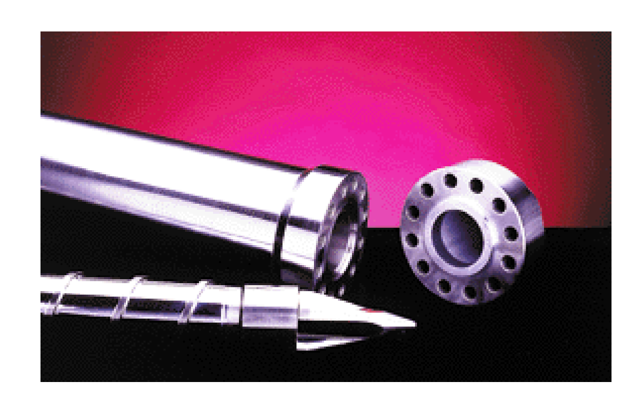
Se aconseja programar perfiles decrecientes de presión de mantenimiento, ya que de esta forma se consigue una aproximación mejor al enfriamiento isocórico (a volumen específico constante) del diagrama PVT y por tanto piezas mejores.



Plastificación

Finalizada la fase de mantenimiento, el husillo puede comenzar a dosificar. El husillo gira y transporta material hacia adelante, quedando almacenado delante del husillo. No sale por la boquilla puesto que el cabezal se encuentra apoyado en el molde, lleno tras la inyección anterior. La progresiva acumulación de material en la parte frontal del husillo obliga a éste a retrasarse y dejar espacio. Cuando el husillo llega a la cota denominada "punto final de dosis", deja de girar.

Al retraso del husillo se opone una presión que se programa en la máquina denominada contrapresión. Esta presión empuja al husillo contra el material que tiene acumulado en la punta, e impide que pueda retroceder por cualquier causa que no sea el volumen del material almacenado en la punta. De este modo se asegura un peso de dosis repetitivo de ciclo a ciclo. Su valor suele ser bajo (5 bares sobre el material suelen ser suficientes).



En general, se programan velocidades de plastificación acordes con el tiempo de enfriamiento. En todo caso, se debe verificar que la velocidad escogida no supere el valor crítico de velocidad periférica recomendado por el fabricante. Por ejemplo, para el nylon 66 cargado con fibra de vidrio, la velocidad crítica es de 0,15 m/s. Si se procesa en un husillo de 60 mm, la velocidad de giro del husillo medido en revoluciones por minuto (r.p.m.) viene dado por la expresión:

$$N(rpm) = \frac{60 \cdot v(m/s)}{\pi \cdot D(m)} = 48 rpm \qquad ,donde \begin{cases} v = velocidad\ crítica \\ D = Diámetro\ del\ husillo \end{cases}$$

La calidad de la mezcla fundida se ve afectada también por el valor de la contrapresión. Si es demasiado alta se incrementa el efecto cizalla y además aumenta el tiempo necesario para realizar la plastificación. Si se colorea material dentro del cilindro, para lograr una mejor dispersión del color, suele ser necesario aumentar la contrapresión.

Cuando se utilizan moldes con cámara caliente se suele practicar también una descompresión tras la etapa de mantenimiento y antes de la etapa de plastificación. El objetivo es descomprimir el material dentro de las cámaras calientes.

Por último, las máquinas permiten programar perfiles de contrapresión y de velocidad de plastificación. Puesto que la cizalla sobre el material depende tanto de la velocidad de giro como de la contrapresión, esta opción puede aprovecharse para plastificar inyectadas consistentes con menor cizalla. La idea es programar velocidades de giro moderadas y contrapresiones bajas durante la etapa de plastificación, y emplear velocidad más baja y mayor contrapresión al final. Esta opción ayuda a reducir la rotura de fibra de vidrio en resinas cargadas.

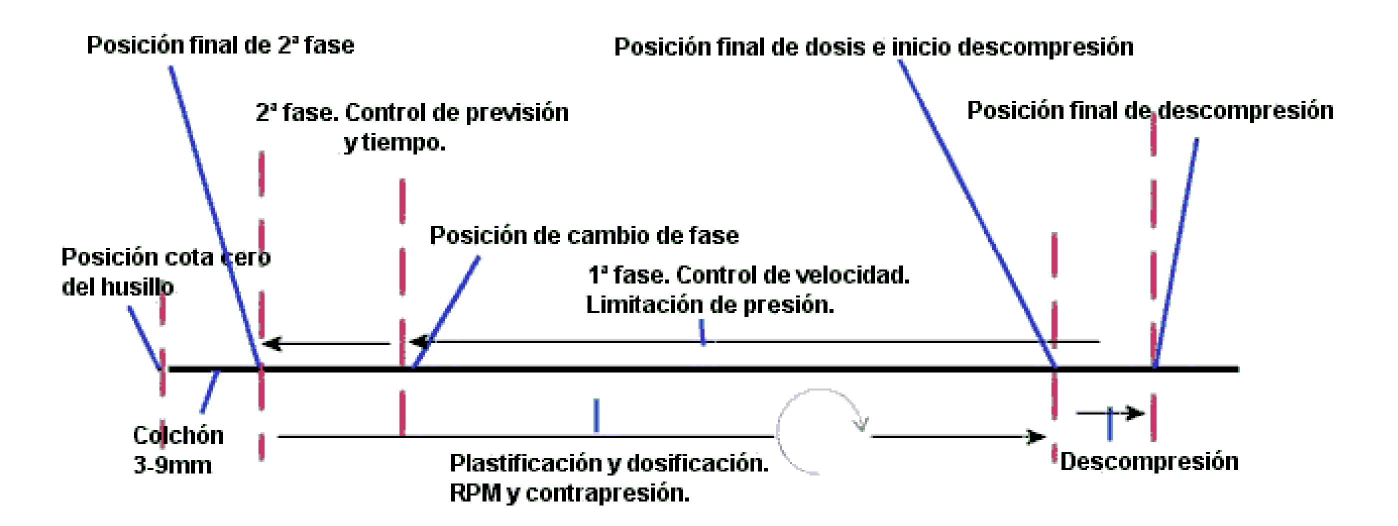
- Descompresión



Descompresión

En esta etapa, el husillo retrocede sin girar (por lo que no carga material en la punta). Su función es descomprimir el material en la punta, de manera que cuando el molde se abra, quedando destaponada la salida de la boquilla, no haya goteo.

La siguiente figura recoge las operaciones que ejecuta el husillo durante el ciclo.





Conmutación de primera a segunda fase

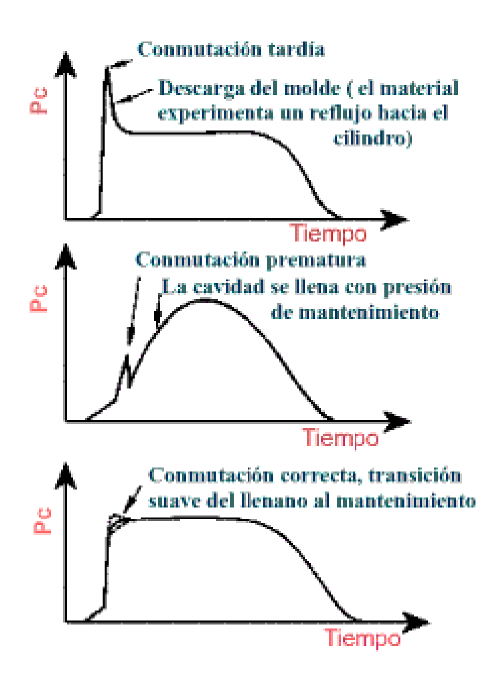
El punto de cambio de primera a segunda fase o punto de dosis es determinante para la calidad de las piezas. Hay varias maneras de realizar ese cambio. A continuación, se recogen las más importantes.

El método más sencillo es el cambio por posición del husillo, en el cual cuando el husillo llega a la cota marcada por el usuario la máquina pasa automáticamente de controlar la velocidad a controlar la presión.

Una segunda opción es realizar el cambio de primera a segunda fase por presión hidráulica (presión en el pistón que acciona el husillo). En este caso, primero habrá que hacer el cambio por posición y una vez que sea satisfactorio, leer el valor de presión hidráulica a la cual se produce el cambio y fijarlo como presión de paso a segunda fase.

El método más recomendable es el de cambio por presión en cavidad. Se mide la presión que ejerce el material en un punto dentro de la cavidad del molde mediante un transductor de presión. El control de la máquina lee esta señal de presión y el usuario puede programar el valor que se considere adecuado.

En la gráfica se muestra la evolución de las presiones en cavidad para diferentes conmutaciones. En el primer caso, la conmutación es tardía. El pico inicial es debido a la inercia del husillo, y esta situación se puede encontrar aunque se conmute antes de que se haya terminado de llenar la cavidad. El pico de presión en cavidad al final del llenado puede causar rebaba (película de material adherida a la pieza), y la pieza puede quedar con mayores tensiones residuales (orientación alta de las cadenas moleculares). La segunda gráfica muestra una conmutación prematura. En este caso, el llenado de la cavidad es lento porque se completa con la presión de mantenimiento, que es baja para un llenado correcto. Ello puede dar piezas con rechupes (hundimiento de la superficie de la pieza por falta de material) y defectos superficiales como marcas de flujo (material frío por velocidad de desplazamiento baja, que no copia adecuadamente la superficie del molde).



Pc: presiones en cavidad

La opción más empleada es la conmutación por posición. Para tomar dicho punto, se inyectan piezas sin segunda fase, y se observa hasta donde llega el frente de flujo con el punto de conmutación elegido. La conmutación se debe dar antes de que el frente de flujo llegue al final de la pieza, cuando se ha llenado alrededor del 95 % del volumen de la cavidad.

La conmutación por presión hidráulica tiene la ventaja de dar una mayor consistencia de ciclo a ciclo, debido a que los medidores de presión son más precisos que los medidores de posición. Esta diferencia fue importante en el pasado, pero las modernas máquinas de inyección presentan una repetitividad de movimientos muy superior a las antiguas, por lo que hoy día no es una razón de peso.

La desventaja es que si oscilan factores importantes, como la temperatura del material o la viscosidad de la resina, el nivel de llenado de pieza al que se da la conmutación variará, variando la calidad de la pieza.



Donde sí puede presentar ventajas la conmutación por presión hidráulica es en moldes multicavidad (varias piezas), en los que la entrada a alguna cavidad se rompa y atasque con frecuencia. Puesto que la presión necesaria para llenar un número cualquiera de cavidades es similar, el que se atasque alguna entrada de alguna de las cavidades no influye en la calidad de las piezas obtenidas en las demás cavidades, y no detiene la producción.

La conmutación por presión en cavidad es una técnica relativamente moderna, y que es muy adecuada para resinas amorfas. El principal objetivo es optimizar y controlar la presión de mantenimiento de cara a reducir las tensiones internas, que son una causa frecuente de fallo en este tipo de materiales. Hay que recordar que en este tipo de materiales, la fase de mantenimiento puede durar hasta que el material llega a su Tg. A temperaturas bajo la Tg, las cadenas no son capaces de relajar la orientación generada durante el mantenimiento. Si esta orientación es excesiva (p.e. por emplear un perfil de presiones de mantenimiento inadecuado), una carga externa, sumada a la carga que suponen las tensiones internas, puede hacer que la pieza falle de manera inesperada.

En general, la conmutación por presión en cavidad es ventajosa para cualquier resina, ya que ayuda a escoger:

- el punto de conmutación adecuado.
- el perfil de presiones de mantenimiento adecuado (presión de mantenimiento variable durante la 2º fase).
- el tiempo de mantenimiento de presión adecuado.

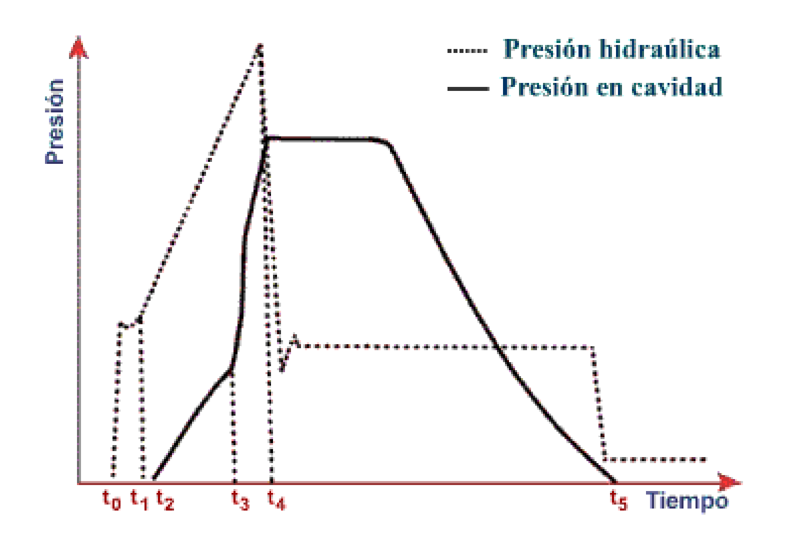
Sin embargo, esta opción requiere colocar medidores de presión en los moldes, siendo más cara que las anteriores. Por ello, sólo se usa en la práctica para resinas amorfas con altos requerimientos de calidad.



Presiones Hidráulicas

Cuando una cavidad se llena controlando la velocidad, en la gráfica de presiones hidráulicas puede ser posible distinguir las siguientes etapas del llenado:

- El llenado del sistema de alimentación (t_0 - t_1).
- El llenado de la pieza (t_1 - t_3).
- Una posible presurización de la cavidad, si la conmutación es muy tardía (no aparece en la gráfica, pero se observaría un repentino incremento de presión).



t0 -t1: llenado de la entrada.
t2: Comienza a subir la presión en la cavidad.
t1 - t3: Llenado de cavidad.
t4 - t5: Presurización del material en la cavidad.
A partir de t5: Alimentación.

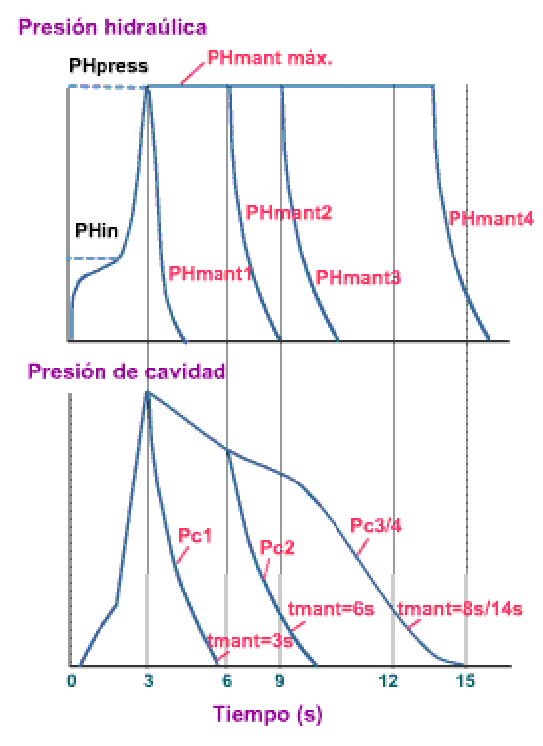
t0 - t3: Etapa de inyección.
t3 - t4: Presurización.
t4 - t5: Etapa de mantenimiento.



Presión de Mantenimiento

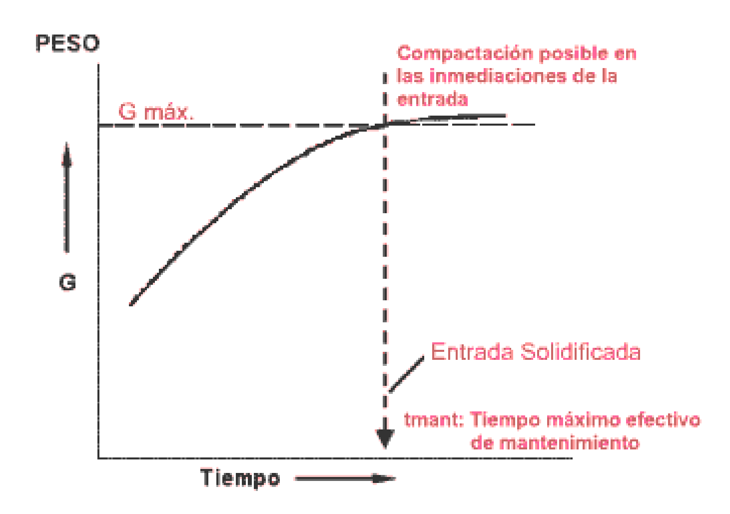
La presión de mantenimiento es la presión ejercida en la pieza durante la fase de mantenimiento o 2ª fase. Se suele tomar como presión de mantenimiento aquella que dé las dimensiones de pieza adecuadas, y para la que no se observen rechupes ni vanos (burbujas o huecos internos provocados por falta de material). En general, para materiales amorfos suele ser del 60 al 80 % de la de inyección, y para materiales cristalinos del 80 al 100 %. Para determinar el tiempo de mantenimiento de presión (TMP) óptimo, lo ideal sería registrar las presiones en cavidad. Si se libera de forma prematura la presión de mantenimiento (antes de que la entrada a la pieza o cualquier otra zona de menor espesor hayan solidificado), se observarán cambios de pendiente repentinos en las gráficas de presión en cavidad. El TMP óptimo es el tiempo mínimo que da una curva continua de presión en cavidad.

En la figura siguiente se muestran gráficas de perfiles de presión hidráulica y presión en cavidad para distintas duraciones de la presión de mantenimiento. Se puede observar que para un tiempo de 8 segundos no se produce ninguna discontinuidad o cambio brusco en la curva de presión en cavidad. Por lo tanto alargar la duración de la fase de mantenimiento más allá de los 8 segundos no tiene sentido ya que no afecta a la calidad de la pieza y supone alargar tiempos de ciclo.



PHin: Presión de inyección
PHpress: Presión de presurización
PHmant: Presión de mantenimiento.

En el caso de no disponer de un medidor o transductor de presión en cavidad, existe un método alternativo para determinar la duración de la fase de mantenimiento que consiste en medir el peso de la pieza en función del tiempo de mantenimiento. La figura siguiente muestra que no se produce un aumento efectivo del peso después del tiempo de mantenimiento máximo efectivo. El efecto de tiempos de mantenimiento mayores es despreciable. Este método sería válido siempre que la entrada a la cavidad estuviera correctamente dimensionada, no impidiendo el paso de polímero fundido hacia la cavidad durante la 2ª fase por solidificarse antes que la pieza.





Velocidad

Las ventajas de una velocidad de avance del husillo alta son varias:

- Mejor llenado de la zona más distante del punto de inyección.
- Mejor enfriamiento de la pieza.
- Tiempo de ciclo reducido.
- Mejor aspecto superficial.
- Mejores características mecánicas.

Por otra parte, el material debería avanzar en la pieza con velocidad de avance del frente de flujo constante para conseguir una correcta inyección. La velocidad de avance del flujo depende de la velocidad de desplazamiento del husillo y del propio diseño de la cavidad del molde.

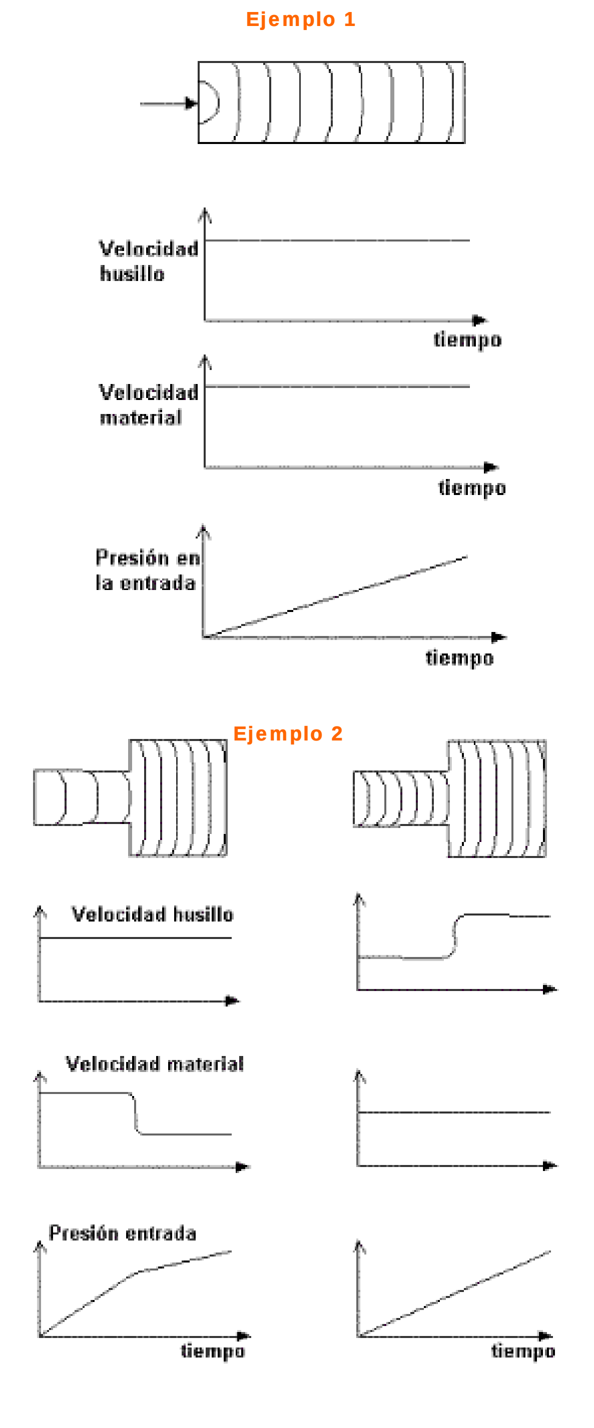
- Si el área de la sección de la pieza a moldear es constante y la velocidad de inyección (velocidad con que se desplaza el husillo) es constante, entonces la velocidad de avance del flujo es constante (Ejemplo 1). Si consideramos que el polímero es un fluido incompresible se cumplirá la conservación de caudales en el cilindro y en la cavidad del molde:

  Caudal cilindro = Caudal cavidad

  Escribiendo el caudal en función de la velocidad y el area de la sección que atraviesa:

  Velocidad husillo x Sección cilindro = Velocidad Frente de Flujo x Sección Pieza

- En condiciones de velocidad constante de avance del husillo, si varía la sección de la pieza, varía también la velocidad de avance del flujo. Para obtener un avance constante del flujo es necesario programar un perfil o curva de velocidades (Ejemplo 2). Una indicación de si se está consiguiendo o no una velocidad constante del flujo es la variación de la presión. Si la gráfica de la presión tiene una variación constante a lo largo del tiempo de inyección (pendiente constante) entonces podemos asegurar que el flujo está avanzando con velocidad constante. Por tanto hay que ir programando el perfil o curva de velocidades hasta que la curva de presión (en la zona correspondiente al llenado de la cavidad) tenga una pendiente constante.



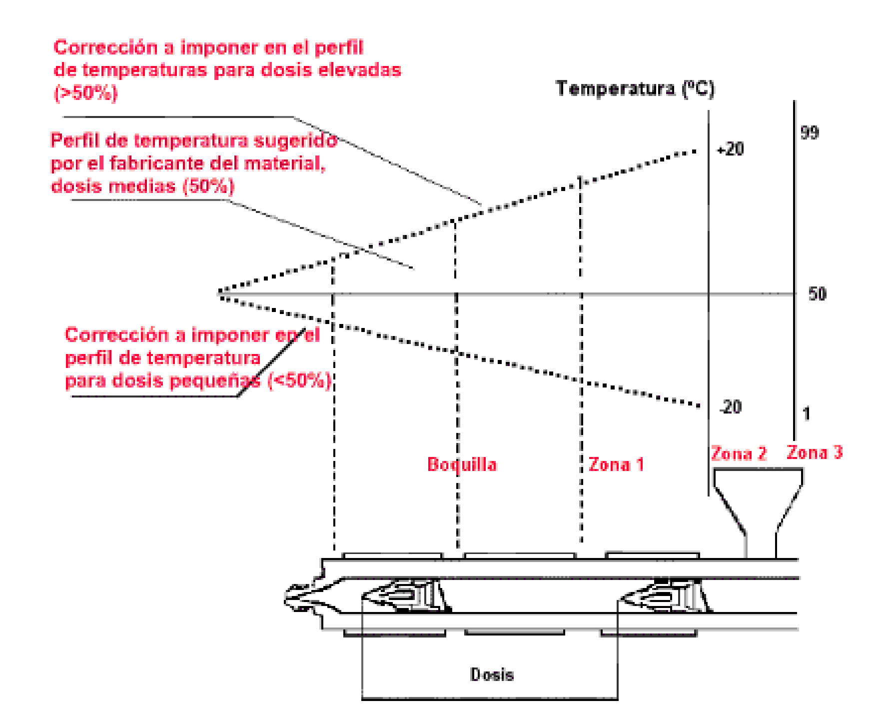


Tiempo de residencia. Perfil de Temperaturas del Cilindro

Se denomina ***tiempo de residencia*** o tiempo de permanencia al tiempo que el material permanece en el interior del cilindro de plastificación. Se puede calcular experimentalmente echando en la garganta de alimentación del cilindro unos pocos granos de un material coloreado que contraste con el que se está inyectando, y midiendo el tiempo que tarda en aparecer el material coloreado en las piezas moldeadas. Un tiempo aproximado se puede calcular como sigue:

$$\text{Tiempo de residencia} = 2 \cdot \frac{\text{dosis máxima}}{\text{dosis } real} \cdot tiempo\, de\, ciclo$$

Cuanto mayor sea el tiempo de ciclo y menor la dosis real, mayor es el tiempo de residencia. Con valores de dosis real muy bajos, el tiempo de residencia es alto y es aconsejable programar temperaturas más bajas en la zona de la tolva para disminuir la degradación térmica. Con valores de dosis elevados, se aconseja emplear temperaturas más altas en la zona de la tolva para obtener una mejor calidad de plastificación. La gráfica indica como se puede modificar el perfil de temperaturas en función de la dosis, buscando obtener el fundido a la temperatura deseada.



Ejemplos:

1.- Si la temperatura de inyección recomendada es de 250 ºC y la dosis es de un 1 % de la dosis máxima que la máquina puede plastificar, las temperaturas serán:

$T_{boquilla}$ = 250 ºC; $T_{Zona\ 1}$ = 243,33 ºC; $T_{Zona\ 2}$ = 236,66ºC; $T_{Zona\ 3}$ = 250 - 20 = 230 ºC

2.- Si la temperatura de inyección recomendada es de 250 ºC y la dosis es de un 25 % de la dosis máxima que la máquina puede plastificar, las temperaturas serán:

$T_{boquilla}$ = 250 ºC; $T_{Zona\ 1}$ = 246,66 ºC; $T_{Zona\ 2}$ = 243,33 ºC; $T_{Zona\ 3}$ = 250 - 10 = 240ºC

3.- Si la temperatura de inyección recomendada es de 250 ºC y la dosis es de un 50 % de la dosis máxima que la máquina puede plastificar, las temperaturas serán:

$T_{boquilla}$ = 250 ºC; $T_{Zona\ 1}$ = 250 ºC; $T_{Zona\ 2}$ = 250 ºC; $T_{Zona\ 3}$ = 250 ºC

4.- Si la temperatura de inyección recomendada es de 250 ºC y la dosis es de un 75 % de la dosis máxima que la máquina puede plastificar, las temperaturas serán:

$T_{boquilla}$ = 250 ºC; $T_{Zona\ 1}$ = 253,33 ºC; $T_{Zona\ 2}$= 256,66 ºC; $T_{Zona\ 3}$ = 250 + 10 = 260 ºC



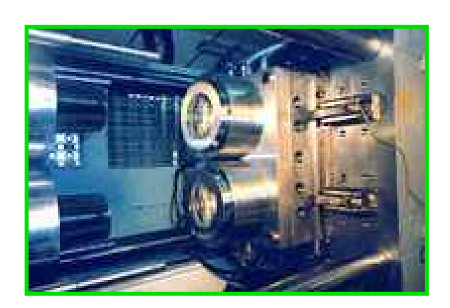
5.- Si la temperatura de inyección recomendada es de 250 ºC y la dosis es de un 100 % de la dosis máxima que la máquina puede plastificar, las temperaturas serán:

$T_{boquilla}$ = 250 ºC; $T_{Zona\ 1}$= 256,66 ºC; $T_{Zona\ 2}$ = 263,33 ºC; $T_{Zona\ 3}$ = 250 + 20 = 270 ºC

Selección de una máquina de inyección

Se deben tener en cuenta las siguientes variables:

- La fuerza de cierre necesaria.
- Las dimensiones físicas del molde.
- La carrera del plano móvil o longitud que la parte móvil del molde se debe separar con respecto a la parte fija para poder extraer la pieza.
- El volumen de material a inyectar debe suponer entre un 20 % y un 80 % del volumen máximo que la máquina pueda inyectar.

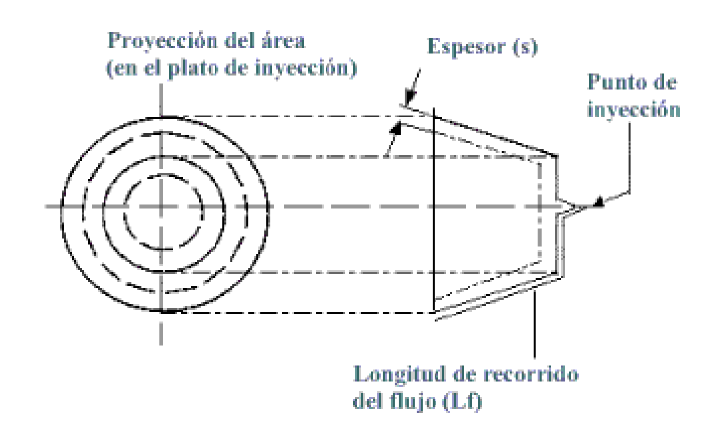


- Cálculo de fuerza de cierre



Cálculo de fuerza de cierre

Se desea inyectar la pieza representada en la figura siguiente:

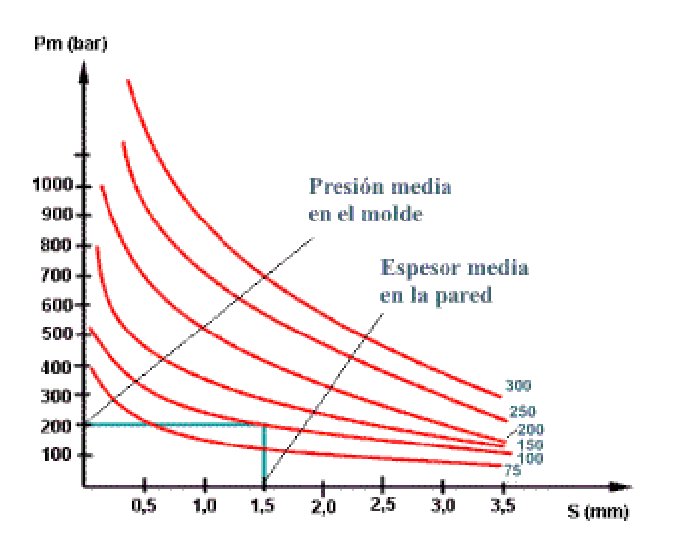


Para determinar el valor de la fuerza de cierre es necesario conocer de antemano dos datos:

- El valor de la proyección del área de la pieza sobre un plano perpendicular a la fuerza de cierre, paralelo a las placas portamoldes (A).
- El valor de la presión media ejercida por el material en el ciclo de inyección (Pm). Este dato depende principalmente del tipo de material utilizado (factor de viscosidad), espesor de pieza y longitud de flujo (longitud que recorre el polímero en el llenado del molde).

Una vez se conocen ambos datos, la fuerza de cierre necesaria es el producto de ambas cantidades: Fuerza de cierre = (Pm) x (A)

La presión media (Pm) se puede estimar mediante el siguiente proceso: Si se conocen la longitud de flujo de la pieza y su espesor, calculamos el cociente Lf / S. Con estos datos, obtenemos mediante la gráfica 1 la presión media en cavidad referida al PS. La pieza: del ejemplo tiene Lf = 150 mm y S = 1,5 mm, siendo Lf / S = 100).



La presión media en cavidad si se inyectara PS sería de 200 bares. Si se inyecta un material más viscoso, la presión de inyección necesaria será mayor, y por tanto la presión media en cavidad también lo será. Para pasar de PS a otro material multiplicaríamos el valor obtenido en la gráfica por el coeficiente de viscosidad correspondiente (ver tabla).

Material	Factor de Viscosidad (C)
GPPS (PS)	1
PP	1 - 1,2
PE	1 - 1,3
Nylons, POM	1,2 - 1,4
Celulósicas	1,3 - 1,5
ABS, ASA, SAN	1,3 - 1,5
PMMA	1,5 - 1,7
PC, PES, PSU	1,7 - 2,0
PVC	2



Ejemplo:

Si el Ø mayor de la pieza de la figura son 20 cms, y se inyecta en PA:

F = (A) x (Pm) = 314 cm^2 x (200 x 1,4) kg / cm^2 = 75.360 Kg = 75 Ton

Existen también otros factores que influyen sobre la fuerza de cierre necesaria, como la geometría de la pieza, y las temperaturas de material y molde. Mayores temperaturas suponen menores presiones en cavidad y una menor fuerza de cierre. A pesar de ello, el método sugerido resulta válido para hacer una estimación adecuada para un proceso típico.



Cálculo del tiempo de enfriamiento

Para piezas tipo cáscara (espesor pequeño frente a la superficie) que es la forma de las piezas inyectadas, el tiempo de enfriamiento viene dado por:

$$t_{enf} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \alpha_{ef}} \cdot \ln\left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_f - T_m}{T_e - T_m}\right)$$

t_{enf}	tiempo de enfriamiento
s	espesor de pared
α_{ef}	difusividad térmica efectiva. (Variable con la temperatura y en el caso de termoplásticos cristalinos debe tener en cuenta el calor latente de fusión)
T_f	Temperatura media del fundido
T_e	Temperatura media de expulsión
T_m	Temperatura media del molde

Tomando valores típicos de temperatura del fundido, molde y expulsión el tiempo de enfriamiento para cada polímero depende únicamente del espesor al cuadrado:

PC	$t_{enf} = 2{,}17 \cdot s^2$
PA6, PBT, LDPE	$t_{enf} = 2{,}64 \cdot s^2$
ABS, PS, SAN, PA66	$t_{enf} = 2{,}82 \cdot s^2$
HDPE, PMMA	$t_{enf} = 3{,}00 \cdot s^2$
PP	$t_{enf} = 3{,}67 \cdot s^2$
POM	$t_{enf} = 4{,}18 \cdot s^2$

El tiempo de enfriamiento da también una medida del tiempo de llenado necesario. El tiempo de llenado debe ser mucho menor que el de enfriamiento para evitar la congelación prematura del fundido durante la fase de llenado. En la práctica, *el tiempo de llenado suele ser de 0,1 a 0,2 veces el tiempo de enfriamiento*.

En general:

Valores de Temperaturas: Tabla TMP

- Cambios en la temperatura de masa repercuten poco en el tiempo de enfriamiento en espesores de pared hasta 4 mm (Para ΔT_f = 10 ºC, Δt_{enf}< 1s)

- Cambios en la temperatura del molde tienen repercusión importante:

s (mm)	2 mm				4 mm			
ΔT_m (ºC)	+ 10	+5	-5	-10	+10	+5	-5	-10
Δt_{enf} (s)	+5	+2	-1	-2	+20	+7	-5	-9

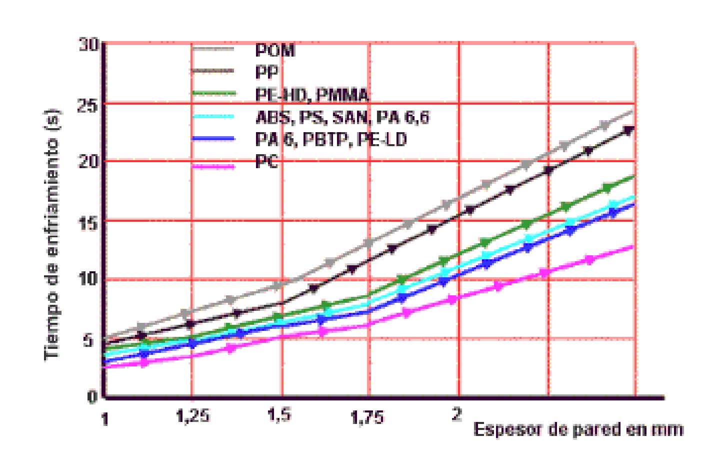
Ejemplo:

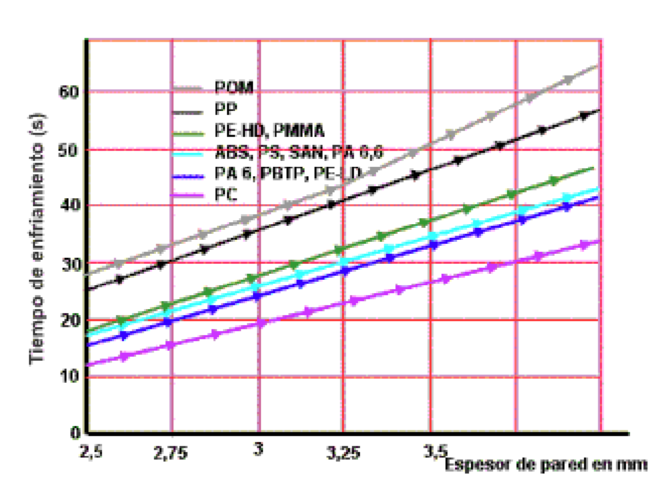


Incrementar la temperatura del molde en 10 ºC supone un aumento del tiempo de enfriamiento de 5 s (2 mm) y 20 s (4 mm).

Para termoplásticos semicristalinos el tiempo de enfriamiento depende de la velocidad de cristalización, por lo tanto de la temperatura a la que se produce la cristalización que a su vez depende de la temperatura del molde.

Representando gráficamente el tiempo de enfriamiento frente al espesor para diferentes materiales:





El tiempo de enfriamiento programado en máquina se obtendría de restar al tiempo de enfriamiento obtenido en estas gráficas el tiempo de mantenimiento o de 2ª fase.

A continuación se explican los tiempos de enfriamiento de:

- Distintas geometrías
- Materiales Cristalinos

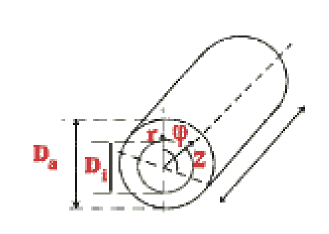


Tiempo de enfriamiento en distintas geometrías.

En el caso de que la pieza inyectada no sea tipo cáscara las expresiones para el cálculo de los tiempos de enfriamiento son las siguientes:

Geometría:	Condiciones de contorno:	Ecuación:
	$\dot{Q}_z = \dot{Q}_x = 0$	$t_{enf} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(\frac{8\,(T_f - T_m)}{\pi^2\,(T_e - T_m)}\right)$ $t_{enf} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(\frac{4\,(T_f - T_m)}{\pi\,(T_e - T_m)}\right)$
	$\dot{Q}_z = \dot{Q}_\varphi = 0$ $L \gg D$	$t_{enf} = \frac{D^2}{23{,}14 \cdot \alpha} \ln\left(0{,}692 \cdot \frac{(T_f - T_m)}{(T_e - T_m)}\right)$ $t_{enf} = \frac{D^2}{23{,}14 \cdot \alpha} \ln\left(1{,}602 \cdot \frac{(T_f - T_m)}{(T_e - T_m)}\right)$
	$\dot{Q}_\varphi = 0$ $L \approx D$	$t_{enf} = \frac{1}{\left(\frac{23{,}14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L}\right)\alpha} \cdot \ln\left(0{,}561 \cdot \frac{(T_f - T_m)}{(T_e - T_m)}\right)$ $t_{enf} = \frac{1}{\left(\frac{23{,}14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L}\right)\alpha} \cdot \ln\left(2{,}04 \cdot \frac{(T_f - T_m)}{(T_e - T_m)}\right)$
	Cubo	$t_{enf} = \frac{h^2}{3\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(0{,}533 \cdot \frac{(T_f - T_m)}{(T_e - T_m)}\right)$ $t_{enf} = \frac{h^2}{3\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(2{,}064 \cdot \frac{(T_f - T_m)}{(T_e - T_m)}\right)$
	Esfera	$t_{enf} = \frac{D^2}{4\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(\frac{2\,(T_f - T_m)}{(T_e - T_m)}\right)$
	$\dot{Q}_z = \dot{Q}_\varphi = 0$ $r < \frac{D_i}{2}$ $\dot{Q}_r = 0$	$t_{enf} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(\frac{8\,(T_f - T_m)}{\pi^2\,(T_e - T_m)}\right)$ $t_{enf} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(\frac{4\,(T_f - T_m)}{\pi\,(T_e - T_m)}\right)$ siendo: $s = D_a - D_i$

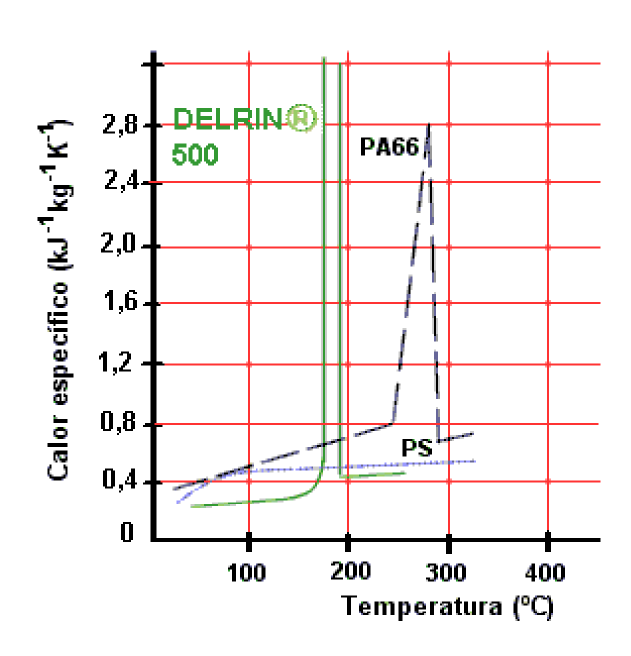


	$\dot{Q}_z = \dot{Q}_\varphi = 0$	$t_{enf} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(\frac{8\,(T_f - T_m)}{\pi^2\,(T_e - T_m)}\right)$ $t_{enf} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \alpha} \ln\left(\frac{4\,(T_f - T_m)}{\pi\,(T_e - T_m)}\right)$ siendo: $s = \frac{D_a - D_i}{2}$



Tiempo de enfriamiento en Materiales Cristalinos.

En materiales cristalinos, las ecuaciones de tiempo de enfriamiento obtenidas tras resolver la ecuación de Fourier, fallan debido al proceso de cristalización. Un primer error es que la ecuación de Fourier sólo considera conducción pura, y no incluye el calor generado dentro de la pieza debido al calor latente de cristalización.

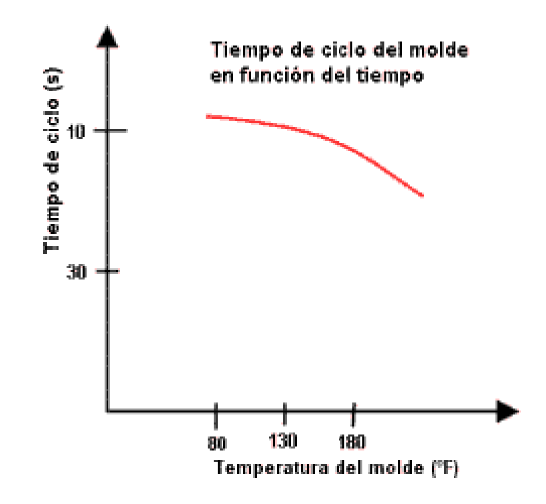


Esta omisión no es demasiado importante, puesto que puede incluirse dentro de la difusividad térmica efectica, suponiendo que el polímero tiene un calor específico promedio, que incluye el calor liberado durante la cristalización.

El error más grave es que, en materiales cristalinos, el tiempo de enfriamiento está en muchos casos limitado por la velocidad de cristalización de la resina. En un material cristalino, se debe hacer mantenimiento hasta que termine de cristalizar todo el espesor de la pieza, y una vez que la pieza ha cristalizado, se puede expulsar tras un tiempo de enfriamiento muy corto o incluso nulo.

La figura siguiente representa el tiempo de ciclo frente a la temperatura del molde para la PA6.

Se observa que, en contra de la intuición, el tiempo de ciclo es menor cuando la temperatura de molde es mayor (por supuesto, ello tiene un límite, tras el cual la tendencia es al contrario). La explicación es que la velocidad de cristalización del material es mayor cuando la temperatura del molde es mayor. En la práctica, se conoce que las máximas velocidades de cristalización se obtienen a valores de ($T_{c,\,max}$ / T_m) entre 0,8 y 0,9. Para un nylon 6, T_m = 220 ºC = 493 K, por lo que la velocidad de cristalización máxima se alcanza a 420 K, esto es, 150 ºC. Para alcanzar temperaturas de cristalización promedio en torno a 150 ºC, se deben emplear temperaturas de molde en torno a 70 u 80 ºC.



Valores de Temperaturas: [Tabla TMP]



TABLA DE VALORES DE TEMPERATURAS

Polímero	Carga	Nombre Comercial	Temperatura de Inyección °C	Temperatura Máxima de Desmoldeo °C	Temperatura de Pared del Molde °C
ABS		CYCOLAC	240	80	60
ABS		NOVODUR	230	95	70
ASA		LURAN	260	100	60
EVA		ELVAX	180	100	30
PA 12		GRILAMID	290	124	100
PA 12	GK 30	GRILAMID	250	120	40
PA 6		AKULON	240	150	80
PA 6	GV 30	AKULON	270	170	80
PA 6	MN 30	AKULON	270	130	80
PA 6	MN 30	AKULON	250	160	80
PA 6.6		ULTRAMID	270	180	80
PA 6.6	GF 30	AKULON	270	190	80
PA 6.6	MN 40	AKULON	280	190	80
PAA	GF 50	IXEF	250	180	140
PAA	GF 40	IXEF	260	180	125
PBTP		VALOX	260	150	60
PBTP	MN 25	ARNITE	250	130	90
PBTP	GV 30	ARNITE	240	145	60
PBTP	GV 30	VALOX	240	145	60
PC		LEXAN	300	110	100
PC		MAKROLON	300	110	100
PC	GV 20	LEXAN	300	147	100
PC	GV 20	MAKROLON	300	147	100
PC	GV 30	MAKROLON	300	140	100
PEEK	HF 30	VICTREX	380		175
PEHD		VAPLATEC	200	100	40
PELD		VAPLATEC	230	95	50
PES		VICTREX	380	180	150
PES	GV 20	VICTREX	380	195	150
PES	GL 30	VICTREX	380	195	175
PETP	GF 36	ARNITE	260	200	140
PETP		RYNITE	260	200	140
PMMA		VEDRIL	270	100	80
PMMA		LUCRYL	230	100	70
POM		HOSTAFORM	200	125	100



POM	GF 30	HOSTAFORM	200	160	100
POM	Chalk	HOSTAFORM	210	125	120
POM	GV 30	HOSTAFORM	200	125	90
POM	GV 30	HOSTAFORM	200	125	90
PP		STAMYLAN	250	125	40
PPE/PS	GV 20	LURANYL	280	125	75
PPH		HOSTALEN	260	100	70
PPN		HOSTALEN	260	100	70
PPN	GV 30	HOSTALEN	260	100	60
PPN	TV 20	HOSTALEN	260	110	60
PPN	TV 40	HOSTALEN	260	100	70
PPO		NORYL	285	130	120
PPO	GV	NORYL	285	140	80
PPO	GV 30	NORYL	290	190	80
PPS	GV 40	RYTON	380	243	130
PPT		HOSTALEN	260	100	60
PPT	GV 20	HOSTALEN	240	110	70
PS		STYRON	220	80	40
PSU		UDEL	**320**	**160**	**95**
PSU	GV 30	UDEL	320	160	95
PUR		ESTANE	200	50	20
SAN		LURAN	270	85	80

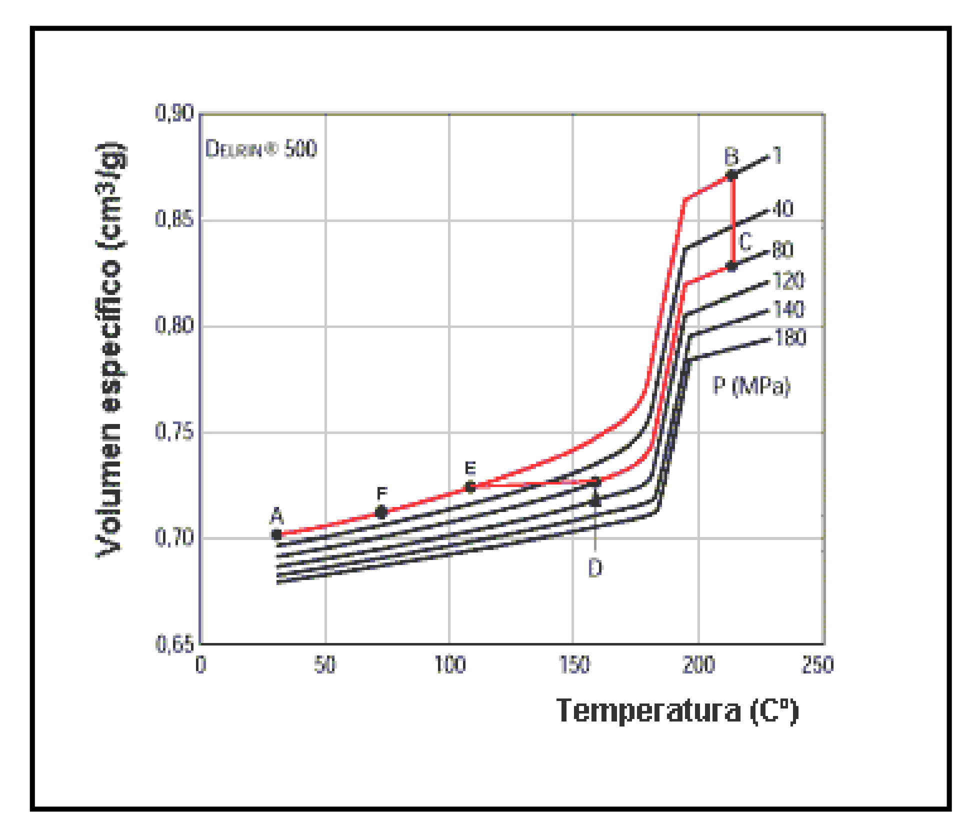


Ejemplo del ciclo de inyección de un material Semicristalino

Representación del ciclo de inyección de un material semicristalino en el diagrama PVT:

Las diferentes etapas están indicadas mediante los puntos A, B, C, D, E, F.

A: Polímero en condiciones ambientales de presión y temperaturas.
A -B: Plastificación o fusión del polímero
B - C: 1ª fase (llenado volumétrico a temperatura constante)
C -D: 2ª fase (la presión a lo largo de la 2ª fase permanece constante. El tiempo de mantenimiento debe durar hasta que se produzca la cristalización correcta del polímero)
D -F: Enfriamiento programado en máquina. Donde en el paso D - E se produce la desaparición de presión en la cavidad.
E -F: Contracción de la pieza con respecto a las dimensiones de la cavidad (la pieza se separa de las paredes del molde).
F: Extracción de la pieza.



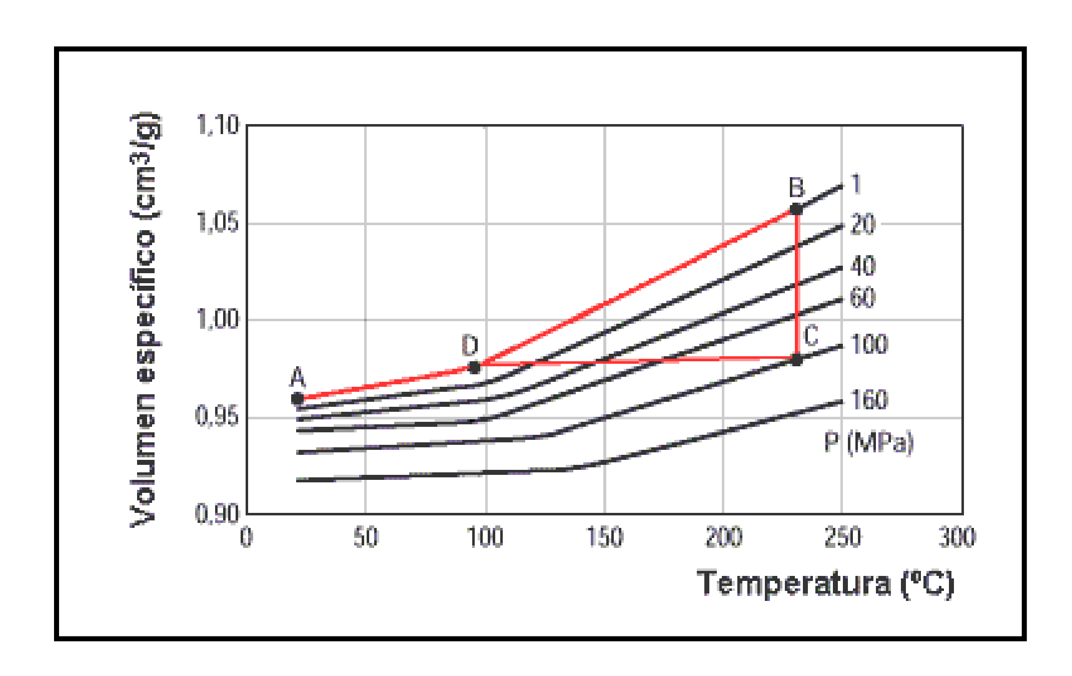


Ejemplo del ciclo de inyección de un material Amorfo

Representación del ciclo de inyección de un material amorfo en el diagrama PVT:

Las diferentes etapas están indicadas mediante los puntos A, B, C, D.

A: Polímero en condiciones ambientales de presión y temperaturas.
A -B: Plastificación o fusión del polímero
B - C: 1ª fase (llenado volumétrico a temperatura constante)
C -D: Enfriamiento programado en máquina (en el ciclo teórico se considera que los termoplásticos amorfos no contraen por lo que no existe una 2ª fase).
D: Extracción de la pieza (Por debajo de la temperatura de transición vítrea)





COEFICIENTES DE CONTRACCIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS

Material	*Coefic.expansión (mm/mmK"1*10⁶)*	*Contracción (%)*
ABS	80	0.3-0,8
Aceta1	80	2.0-3.5
Acrílicos		0.4 - 0,7
Nylon 6,6	120	1.5-2.0
Nylon 6	10	1.0-1.5
Nylon 11	150	1.2
Nylon 12	104	1.0
Policarbonatos	70	0.6-0,8
Polietileno (LD)(PE)	170	2.0-3.5
Polietileno (HD)(PE)	120	2.0-3.5
Polietileno,30% reforzado		0.4 - 0.45
PET(botellas)		0.5-1.2
PMMA	110	0.1 -0.8
Polipropileno(PP)	110	1.5-2.5
PP, 30% Carga de vidrio		0.4 - 0.45
Poliestireno(PS)	70	0.2-0,6
Poliestireno (rubber modificado)	120	0.2-0.8
PS, (30% Carga de vidrio)		0.05-0.1
PVC		0.3-0.8
PVC30% Carga de vidrio		0.1 -0,2

www.matweb.com



Introducción a la Máquina de Inyección

La inyección de termoplásticos es un proceso cíclico. Se parte de material sólido en forma de granza, que se funde en un cilindro plastificador. El plástico fundido es un fluido viscoso que, con el empuje de una presión suficiente, se inyecta rápidamente en una cavidad (molde), que reproduce el negativo de la pieza que se desea obtener. El material se enfría dentro del molde, y cuando vuelve a estar lo suficientemente rígido, el molde se abre y la pieza puede ser expulsada. El molde se cierra y vuelve a comenzar el proceso.



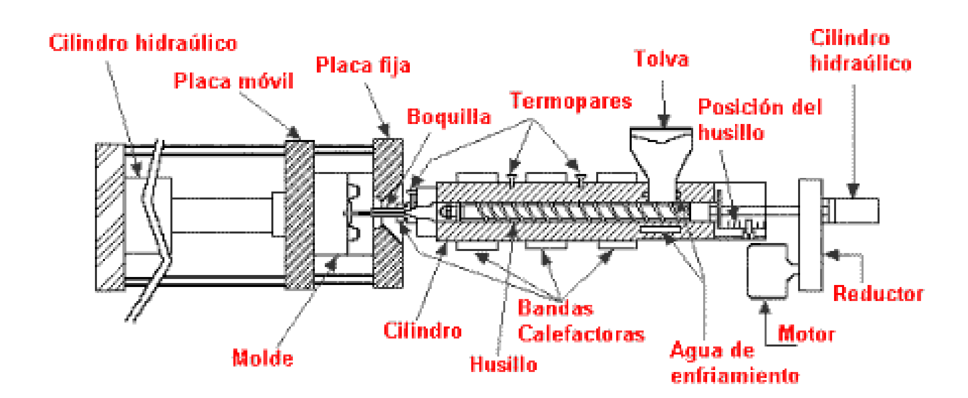
Una máquina de inyección se divide en dos partes: la unidad de inyección y la unidad de cierre. La unidad de control suele estar integrada en la estructura de la máquina entre la unidad de cierre y la de inyección o bien separada de la máquina.



	Partes más importantes:	**Funciones:**
Unidad de inyección o de plastificación	Tolva de alimentación. Cilindro de plastificación. Resistencias calefactoras. Husillo de plastificación. Tobera. Boquilla.	Fundir la dosis de material necesaria para cada ciclo. Inyectar la dosis programada.
Unidad de cierre	Placas portamoldes fija y móvil. Columnas. Mecanismo de cierre (placa posterior, rodilleras,…). Sistema de expulsión.	Ejecutar los movimientos de apertura y cierre del molde. Expulsar la pieza.

La siguiente figura representa una máquina de cierre hidráulico:





La siguiente figura representa una máquina de cierre mecánico :



A continuación veremos con más detalle las dos unidades principales de la máquina de inyección:

- La unidad de cierre de moldes
- La unidad de inyección



La unidad cierre moldes

Los principales componentes de un sistema de cierre son:

- Platos de fijación (fijo y móvil): Son los dos platos (fijo y móvil) en los que se fijarán, las dos mitades del molde correspondiente. Debe cuidarse, en su diseño de forma especial la robustez (dado que la máquina los someterá a lo largo de su vida a millones de ciclos) y su rigidez.



- Columnas: Cuando entra la fuerza de cierre del molde, sufren un determinado alargamiento, comportándose como grandes muelles. El diámetro de las columnas debe ser elegido de forma que garantice que el alargamiento de las mismas sea moderado y siempre dentro de la zona de deformación elástica (recuperable).

- Dispositivo de cierre, soportado por el plato posterior:

  Existen dos tipos de cierre:

  - Sistema de cierre mecánico asistido
  - Sistema de cierre hidráulico

- Elementos auxiliares: En este apartado entran los sistemas de control del movimiento del molde, dispositivos de lubricación, dispositivos de seguridad, el mecanismo extractor y el sistema de ajuste del ancho de molde. Solo estudiaremos en profundidad los dos últimos:

  - Ajuste del ancho de molde
  - Dispositivos de extracción

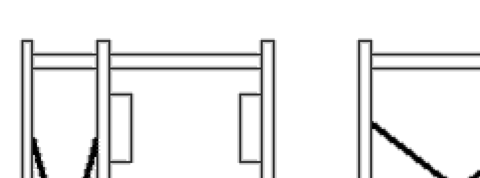


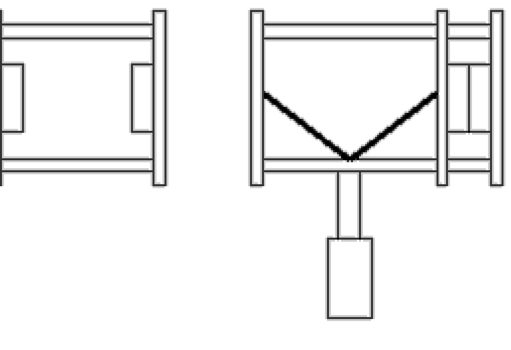
Sistema de cierre mecánico asistido

Se trata de un cilindro hidráulico que empuja a la parte móvil a través de unas palancas o rodilleras, cuyo efecto es multiplicar la fuerza de cierre que hace el cilindro.

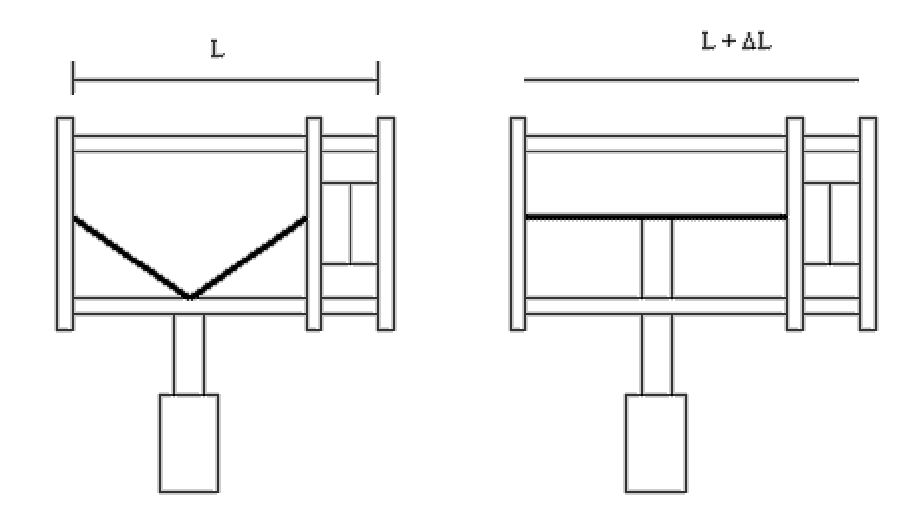
El cierre del molde se puede dividir en dos etapas principales, que son el desplazamiento de la parte móvil y el cierre propiamente dicho. En la fase de desplazamiento, la rodillera se estira hasta que las dos mitades del molde se tocan. En esta fase, debido al efecto multiplicador de la rodillera, el desplazamiento del plato móvil es alto en comparación con la carrera del pistón.

Carrera de desplazamiento





Carrera de cierre



En la fase de cierre, el plato móvil se desplaza, respecto del plato posterior de la máquina, una distancia equivalente al alargamiento de las columnas. Este desplazamiento es pequeño, y, debido a la multiplicación de la rodillera, se corresponde con un desplazamiento mayor del pistón.

Si tenemos en cuenta el principio de conservación de la energía:

$W_{PISTON} = F_p * D_p = F_{PM} * D_{PM} = W_{PLATO\ MOVIL}$, siendo $\begin{cases} F = \text{Fuerza} \\ D = \text{Distancia} \end{cases}$

Despejando, obtenemos los siguiente:

$$F_{PM} = \frac{D_P}{D_{PM}} \cdot F_P$$



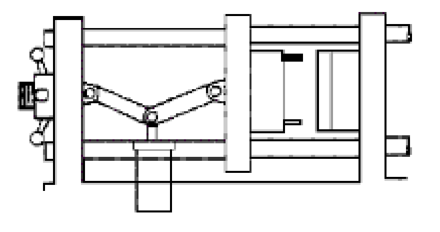
Rodillera simple: La fuerza de cierre se ejerce en un punto de la placa portamolde móvil, lo cual facilita la deformación de dicha placa.

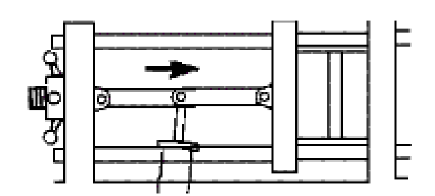
Rodillera doble: La fuerza de cierre se ejerce en los extremos de la placa portamolde móvil, lo que reduce su deformación. Este tipo de rodillera puede ser según el número de rotulas o puntos de giro de las rodilleras:

- De 4 puntos.
- De 5 puntos.

Rodillera simple:

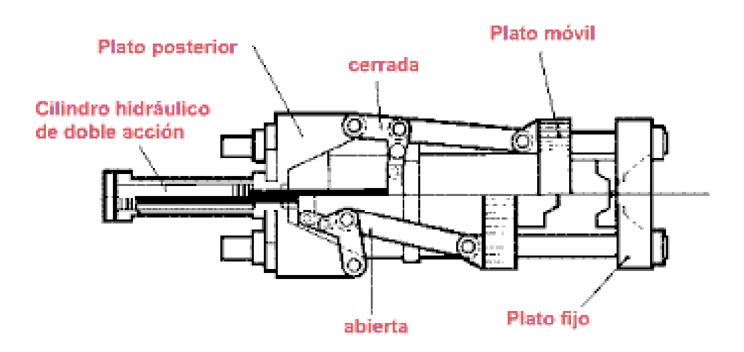
El cierre con rodillera simple movida hidraúlicamente mediante un cilindro de doble acción es típico de las máquinas pequeñas de hasta 50 Ton de fuerza de cierre.





Rodillera doble:

El cierre mediante rodillera doble es adecuado para máquinas situadas entre 250 y 1.000 Ton de fuerza de cierre. De todos los diseños el que se ha impuesto es el de rodillera doble de 5 puntos con cilindro de accionamiento central.



Sistema de doble rodillera con cilindro central.

A continuación se enumeran las ventajas y desventajas de estos sistemas de cierre.

Ventajas:

- Elevadas velocidades de desplazamiento con menores caudales de aceite.
- Empleo de cilindros de dimensiones reducidas.
- Máxima carrera de apertura independiente del espesor del molde.

Inconvenientes:

- Mantenimiento más caro que en el cierre hidráulico (más partes móviles).
- Mayor probabilidad de rotura de columnas y deformación de platos que en las máquinas de cierre hidraúlico.



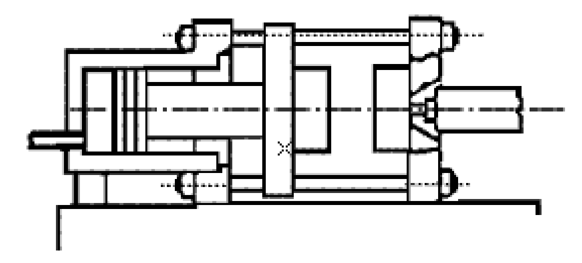
Sistema de cierre hidráulico

Podemos distinguir principalmente dos tipos de sistemas:

- Cierre simple.
- Cierre con pistón auxiliar.

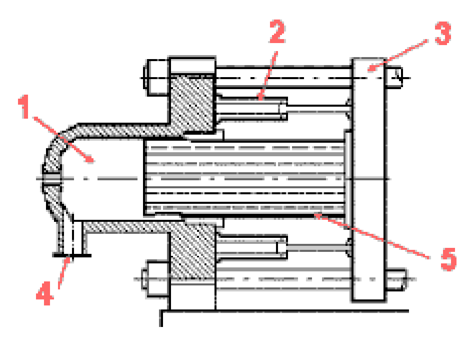
En el sistema con cierre simple, el desplazamiento y la fuerza de cierre se consiguen directamente mediante un pistón hidráulico.

La fuerza realizada se obtiene sin más que multiplicar la superficie del pistón por la presión que actúa sobre el mismo.



Esquema de cierre hidraúlico en su forma más sencilla

La fuerza de cierre puede obtenerse en cualquier punto de carrera del pistón, por lo que no es necesario ajustar la posición de la placa posterior cuando se cambia de molde. Los sistemas de cierre hidráulico utilizados en la actualidad cuentan con cilindros auxiliares. Su misión es conseguir velocidades de desplazamiento elevadas (ver figura).

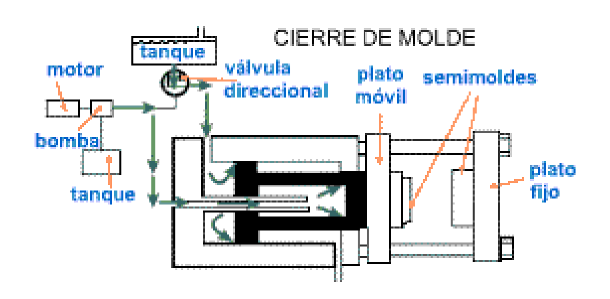


Cierre hidráulido con dos cilindros auxiliares para altas velocidades de trabajo.
(1) Cilindro pincipal, (2) pistón auxiliar, (3) plato móvil, (4) válvula de cierre, (5) pistón principal.

Durante la carrera de desplazamiento, trabajan únicamente los cilindro auxiliares, y el cilindro principal aspira fluido de un depósito, a través de una válvula que se mantiene abierta. Al final de la carrera de cierre, esta válvula se cierra y entra en el cilindro principal el fluido a presión que genera la fuerza de cierre. Para la operación de apertura del molde, vuelve a abrirse la válvula que conecta el cilindro principal con el depósito, y el trabajo lo efectúan los cilindros auxiliares.

Con este tipo de sistema son posibles velocidades mucho mayores para el cierre y la apertura a igualdad de potencia, debido al volumen relativamente pequeño de los cilindros auxiliares.

El diseño de cierre hidráulico con pistón auxiliar más empleado tiene el cilindro auxiliar en disposición central, como se muestra en la figura:

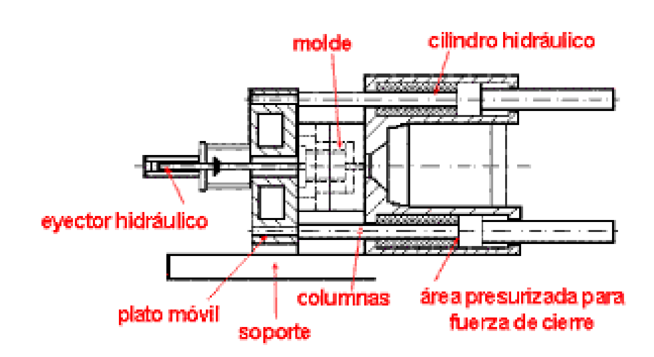


Controlando los caudales hacia los cilindros auxiliares, se regulan las velocidades de apertura y cierre.

Las máquinas con sistema de cierre hidráulico "compacto" se diseñan como muestra la figura. Las columnas están conectadas con cuatro cilindros de cierre que actúan simultáneamente. La fuerza de cierre se consigue aplicando presión en estos cilindros.



En la apertura, la presión actúa sobre la superficie (reducida) del área opuesta. La ventaja de este diseño es unas dimensiones globales reducidas. Como inconveniente, la accesibilidad en la zona de apoyo de la boquilla es menor.



En resumen, podemos decir que las características principales del sistema de cierre hidráulico son:

1.- La fuerza de cierre puede desarrollarse en cualquier punto de la carrera de cierre. Así mismo, es fácil de ajustar y medir.

2.- Aplicación central de la fuerza de cierre sobre una superficie amplia, lo que permite un mejor reparto de esfuerzos sobre los platos, evitando problemas de deflexión o deformación.

3.- Disposición mecánica extremadamente simple y menor número de piezas móviles, en comparación con las máquinas de rodillera.

4.- Mayor coste y mayor gasto energético que los sistemas equivalentes de rodillera.



Ajuste del ancho de molde

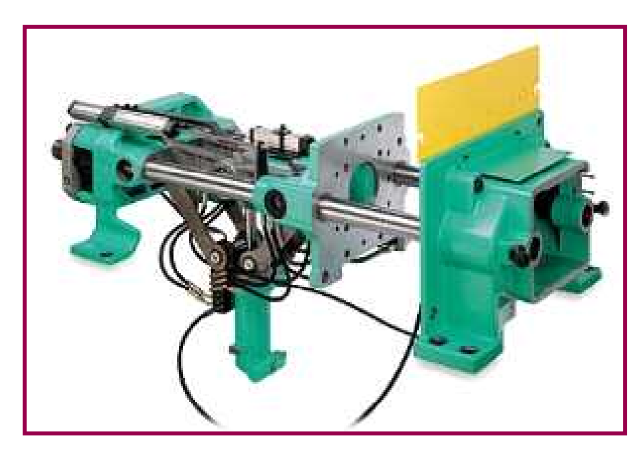
Máquinas hidráulicas

Cuando se comparan las ventajas de las máquinas de cierre hidráulico y las de rodillera, se perciben claramente dos puntos importantes. En la máquina de cierre hidráulico puede obtenerse fácilmente una gran carrera de apertura aumentando la longitud del cilindro principal y la carrera del pistón. Por otra parte dichas máquinas no tienen una carrera fija (que es la característica, como se ha visto, de las máquinas de rodillera) y pueden ejercer la fuerza de cierre en cualquier punto de su carrera (característica de las máquinas hidráulicas).

El espesor mínimo teórico del molde será equivalente a la distancia entre los platos móvil y fijo cuando el pistón de cierre esté todo lo más desplazado posible.

Los moldes de mayor espesor pueden montarse en la máquina sin ninguna dificultad (siempre que su espesor lo permita) ya que el pistón de cierre ejercerá su fuerza de cierre tan pronto como se encuentren las dos mitades del molde.

Parece obvio que en la máquina de cierre hidráulico, un incremento del espesor del molde por encima del mínimo traerá como consecuencia una disminución de la carrera de apertura.



Unidad de ajuste hidraúlico

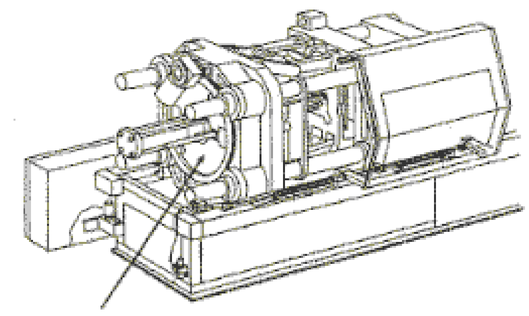
Esto no representará ningún problema siempre que la carrera de apertura tenga la magnitud suficiente para permitir la expulsión de la pieza. Sin embargo en el caso de moldes de gran espesor, como es el caso de fabricación de piezas de profundidad considerable, se requerirá una gran carrera de apertura.

Máquinas de rodillera

La máquina de rodillera tiene una carrera de apertura fija, que es la carrera entre la rodillera totalmente extendida (molde cerrado) y la rodillera totalmente retraída. Si cambia la altura del molde, el sistema de cierre debe ajustarse a la nueva altura del molde. El sistema de ajuste más empleado consiste en un plato posterior que se encuentra amarrado a las columnas mediante tuercas roscadas (ver figura). El ajuste de la altura se realiza moviendo el plato posterior, la rodillera y el plato móvil de forma conjunta.. Ello significa que el plato móvil puede ajustarse para obtener el espacio requerido para diferentes alturas de molde.



Las tuercas deben ser accionadas simultáneamente de forma que tengan el mismo desplazamiento angular. La figura muestra un mecanismo de desplazamiento del sistema de cierre mediante tornillo sin fin. Otro mecanismo muy usual cosiste en una rueda dentada central que hace girar las cuatro tuercas. La rueda suele accionarse con un pequeño motor eléctrico.





Dispositivos de extracción

El proceso de extracción suele realizarse usando, tanto sistemas mecánicos como hidráulicos, neumáticos o combinaciones de estos.

A continuación describiremos los distintos sistemas de extracción:

Extracción mecánica

Generalmente se proyecta el molde para que la pieza quede en la parte móvil. Debido a la contracción del material, la pieza tiende a quedarse en la parte móvil del molde, especialmente en el caso de piezas profundas.

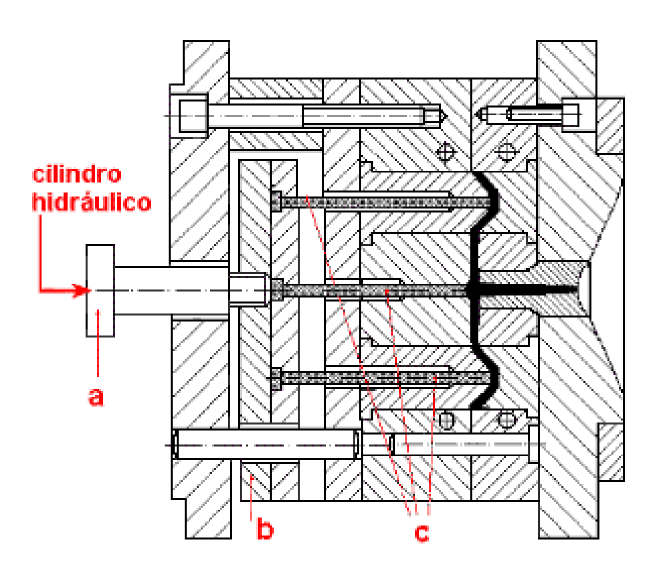
Es el sistema más simple. En la carrera de apertura del molde, la placa expulsora se mueven hacia delante cuando la barra expulsora choca con una barra ajustable amarrada en la máquina, expulsándose así la pieza. La placa expulsora retrocede en la carrera de cierre, bien por la acción de unos muelles o simplemente por empuje cuando las caras del molde hacen contacto. La principal virtud de este tipo de extracción es su simplicidad, mientras que su principal inconveniente es la falta de control. La extracción debe realizarse en la parte lenta del movimiento de apertura, al final de la carrera, para minimizar los posibles daños, tanto sobre el molde como sobre la pieza y los componentes del sistema de extracción.

a: Tope con barra expulsora.
b: Placa expulsora.
c: Extractores.

Extracción hidráulica

La principal ventaja de estos sistemas es la posibilidad de regular totalmente las condiciones de extracción. Pueden controlarse tanto la fuerza que hacen los extractores (mediante la presión sobre el cilindro extractor) como la velocidad de extracción.

La extracción puede comenzar tan pronto como comienza la apertura del molde, lo que aumenta la productividad, siendo su velocidad independiente de la del plato móvil.

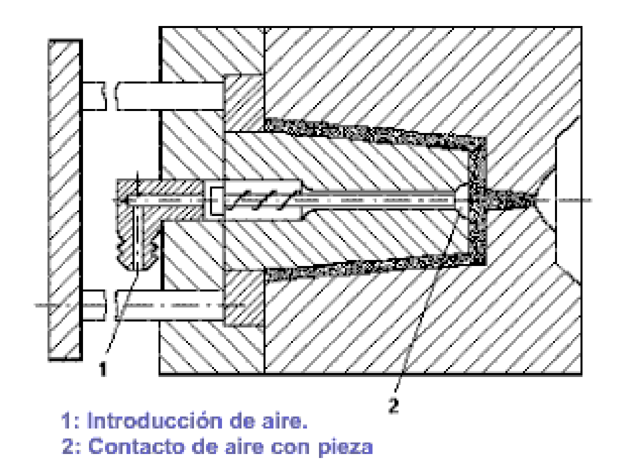


a: Tope con cilindro hidráulico.
b: Placa expulsora.
c: Extractores.



Extracción neumática

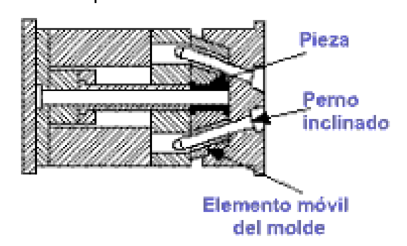
Se emplea principalmente para desmoldear piezas profundas (requieren elevadas fuerzas de extracción) y con poca conicidad (apenas existe contacto entre los extractores y la pieza), en las que es preciso introducir aire entre la pieza y el núcleo del molde en la fase de extracción para romper el vacío que se crea en dicha fase.

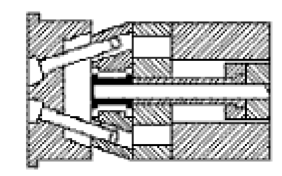


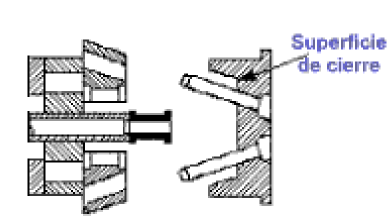
Salida de machos laterales (contrasalidas)

En las piezas con contrasalidas, zonas verticales de la pieza que se oponen al desplazamiento horizontal para su extracción, para desmoldear es preciso retirar previamente el macho lateral. A menudo, los machos laterales van montados sobre carros que se desplazan empujados por vástagos inclinados.

Funcionamiento de un molde de corredera con pernos inclinados.

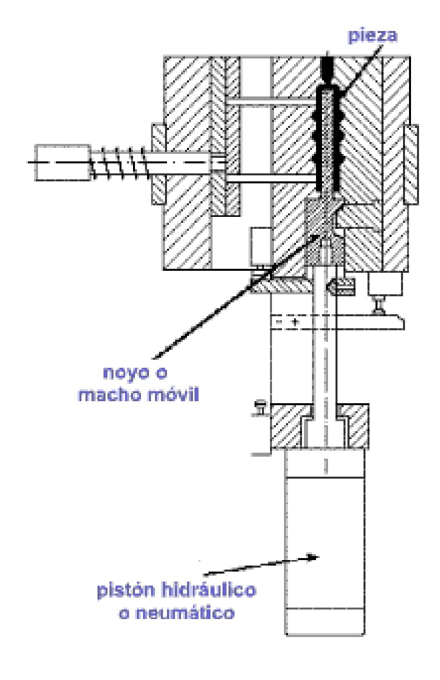








Pero cuando es necesaria una gran carrera de un macho lateral se emplean cilindros hidráulicos o neumáticos para retirar el macho. En este caso, es necesario un equipo de control hidráulico y eléctrico que permita que los machos móviles sean accionados en el momento preciso del ciclo de la máquina. Si la máquina tiene también un sistema de expulsión hidráulico, los machos deberán estar sincronizados con el extractor según el ciclo adecuado.





La unidad de inyección

La función de la unidad de inyección consiste en plastificar (fundir) el material e introducirlo en la cantidad deseada en el molde. Pero además, la masa se debe plastificar sin que sufra esfuerzos térmicos o mecánicos que puedan perjudicar las propiedades de la pieza acabada, debe ser uniforme (correcta dispersión de aditivos y cargas, ausencia de gránulos sin fundir) y su temperatura debe ser homogénea.
La unidad de inyección se desplaza a lo largo de barras guía, hasta ajustarse con el molde. Este ajuste es necesario para poder adaptarse a la longitud de la boquilla y la profundidad del asiento del bebedero que en principio no son iguales en todos los casos.

Los principales componentes de la unidad de inyección o cabezal son:

- Cilindro de plastificación
- Tornillo o husillo de plastificación
- Válvula antirretorno
- Boquilla
- Guiado de la unidad de inyección

Unidad de inyección





Cilindro de plastificación

El cilindro de plastificación está alimentado por la tolva a través del "bloque de tolva". Este bloque es refrigerado por agua para evitar el apelmazamiento del material en la garganta de alimentación y la consiguiente obstrucción.

Se calienta por zonas controladas individualmente, y el número de zonas depende de la longitud del cilindro. A cada zona hay asignadas varias bandas calefactoras y un termopar. La temperatura de consigna se mantiene mediante el controlador correspondiente a dicha zona. Las presiones de funcionamiento en el cilindro pueden ser altas (2.500 bar) y debe ser diseñado para soportarlas. También es necesario que sea resistente a la corrosión y al desgaste, para lo cual el cilindro suele estar nitrurado, o se añade una capa (bimetálicos) o revestimiento interno de alta resistencia al desgaste.



Nitrurado

La nitruración consiste en exponer el acero del cilindro a iones nitruro para formar nitruros que dan una capa superficial de gran dureza. Se suelen usar aleaciones especiales que contienen aluminio, cromo o molibdeno, porque dan nitruros de gran dureza. Este tratamiento origina un cambio de dimensiones en la pieza, por lo que se debe dar un acabado posterior para conseguir las dimensiones adecuadas. La capa dura puede tener un espesor variable de 0,2 a 0,7 mm. en función de la temperatura y el tiempo de nitrurado. La dureza de la capa disminuye con su profundidad, y en la superficie puede ser de 70 en la escala Rockwell C (HRC 70).

Cilindros bimetálicos

Los cilindros bimetálicos pueden ser hechos depositando una capa de revestimiento interior por centrifugado o fabricándola por separado e introduciéndola posteriormente a presión. Son más populares en Estados Unidos que en Europa. El espesor del revestimiento es del orden de 1,6 a 2 mm.

La resistencia a la corrosión depende principalmente del contenido en cromo del acero con un rango de 9 a 32 % en cilindros bimetálicos, y un máximo de 2 % en los nitrurados. Los cilindros bimetálicos superan en duración a los nitrurados en un factor de 3 a 1, y es recomendable su uso, aunque sean más caros. Son los más indicados si se trabaja con materiales reforzados con fibra de vidrio (muy abrasivos). De todas formas el estandar suele ser siempre nitrurado.



Husillo de plastificación

El husillo transporta, plastifica e inyecta el material fundido dentro del molde. Consiste en un eje con una hélice a modo de tornillo sinfín, que cuando gira dentro del cilindro hace avanzar el material. El material se plastifica por el calor generado. mecánicamente y por el calor aportado por las resistencias colocadas en el cilindro.

El calor generado mecánicamente proviene del esfuerzo de rozamiento o cizalla. Existen husillos diseñados específicamente para cada material, y se diseñan para que aporten un 80% del calor necesario para fundir el material. El resto del calor necesario lo aportan las resistencias del cilindro. Se prefiere el aporte de calor mecánico frente al térmico ya que aquél se puede aportar rápidamente (en el tiempo que tarda el material en recorrer el cilindro), y es un calor generado en el mismo seno del material, por lo que da una menor degradación.

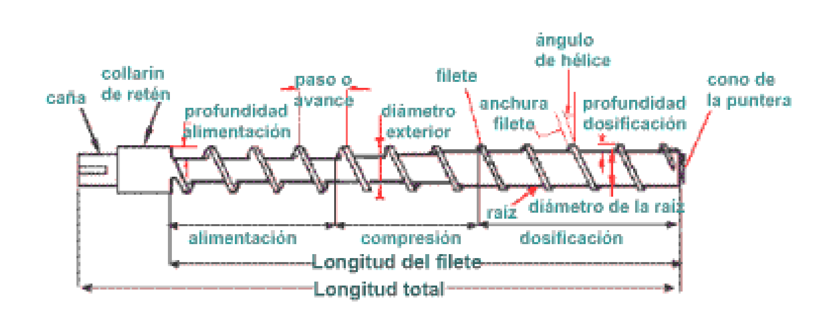
El tornillo debe soportar materiales abrasivos, pero debe ser menos duro que el cilindro, de manera que se desgaste el husillo y no el cilindro.

El husillo puede dividirse en 3 zonas:

- **zona de alimentación.** Profundidad de canal grande y uniforme. El material comienza a calentarse, las partículas se apelmazan y se mueven como una masa maciza o pistón. La masa avanza tanto más rápido cuanto mayor sea el rozamiento con la pared del cilindro y menor con el husillo. Este "pistón" empuja al material que debe atravesar la zona de compresión, donde la resistencia al avance es elevada. De hecho, en extrusión se conoce que si la temperatura en esta zona aumenta por encima de cierto valor, (lo que reduce el rozamiento debido a la formación de una capa superficial de fundido de baja viscosidad) el caudal de salida se reduce de forma importante.

- **zona de compresión.** La profundidad de canal disminuye progresivamente para cizallar el material plástico y fundirlo. La mayor parte del calor que se aporta al material en esta zona (esto es, el calor necesario para fundirlo) se hace en forma de energía mecánica. A su fin, el material debiera estar ya totalmente fundido.

- **zona de dosificación o bombeo.** Canal poco profundo y uniforme. La resistencia al avance en esta zona es menor que en la anterior, ya que el material se encuentra totalmente fundido.
  Por ello, se suministra menos calor por cizalla y más por conducción y convección, de manera que la temperatura en esta zona del cilindro es la que más influye sobre la temperatura a la que sale el fundido. La misión de esta zona es lograr un fundido homogéneo, a una temperatura igual a la programada.



Casi todos los husillos se diseñan siguiendo las siguientes normas de diseño:

1.- La profundidad del filete es constante en las zonas de alimentación y dosificación, y disminuye linealmente en la zona de compresión.

2.- La anchura de filete es normalmente 0,1 · D.



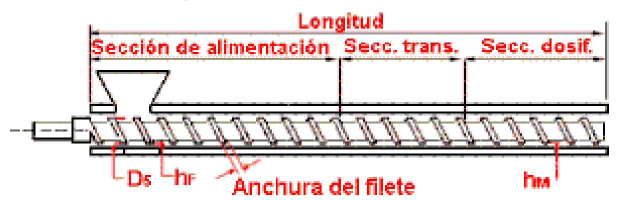
3.- El ángulo de hélice es 17,7º. Este ángulo es tal que por cada vuelta de filete, la distancia axial recorrida es igual al diámetro del husillo. Por tanto, *el paso o avance* es igual al diámetro.

4.- La holgura entre el husillo y el cilindro es alrededor de 0,001 D.

Los husillos se diferencian entre sí en:

- El diámetro del husillo. Viene determinado por el tamaño de la máquina.
- La relación Longitud / Diámetro. Normalmente, la longitud del husillo se da en forma de este cociente. Un valor de L / D de 20 significa también que el canal del husillo da 20 vueltas, ya que como se ha visto el avance es igual al diámetro para husillos con un ángulo de hélice de 17,7º.
- Relación de compresión. Es la relación (Volumen alimentación entre Volumen dosificación) o la relación (profundidad de alimentación entre profundidad de dosificación). Cuanto mayor es, mayor es el calor aportado por cizalla en la zona de compresión. Para materiales amorfos, se recomiendan valores de Rc entre 2,0 y 2,5. Los materiales cristalinos requieren mayor calor para poder fundir (energía latente de fusión), por lo que se recomiendan valores de 2,5 a 4,0.
- Por último, debe conocerse la profundidad del canal en la zona de alimentación. Si la profundidad es excesiva, puede que el husillo no sea capaz de fundir el material debido a cizalla insuficiente. Además existe riesgo de rotura del husillo. Si la profundidad es baja, el material puede llegar a sobrecalentarse por cizalla excesiva. Usualmente, la profundidad del canal en la zona de alimentación varía entre 0,2 · D y 0,1 · D en función del diámetro del husillo.

Con los datos anteriores, queda completamente definida la geometría de un husillo. En la figura siguiente, se muestran las recomendaciones de diseño para procesar la resina Zytel HTN de Du Pont (nylon).



Diámetro del husillo (D5) en mm(en pulgadas)	Profundidad del canal (hF) en mm (en pulgadas)	Profundidad de dosificación (hM) en mm (en pulgadas)
38 (1,5)	7,6 (0.300)	2,2 (0,085)
50 (2,0)	8,1 (0,320)	2,7 (0,105)
65 (2,5)	9,7 (0,380)	3,1 (0,120)
90 (3,5)	11,2 (0,440)	3,6 (0,140)
115 (4,5)	12,7 (0,500)	3,8 (0,150)

La relación de compresión de los husillos anteriores es:

Diámetro 38 mm Rc = 7,6 / 2,2 = 3,4
Diámetro 65 mm Rc = 9,7 / 3,1 = 3,1
Diámetro 115 mm Rc = 12,7 / 3,8 = 3,3

La relación entre el diámetro y la profundidad del canal en la zona de alimentación es:

$$h_f = 1,2 \cdot D^{0,5}$$

Las máquinas de inyección suelen venir equipadas con un husillo universal o "general purpose screw". Este husillo es adecuado para plastificar todo tipo de resinas. Sus características típicas son:

- L / D igual a 20.

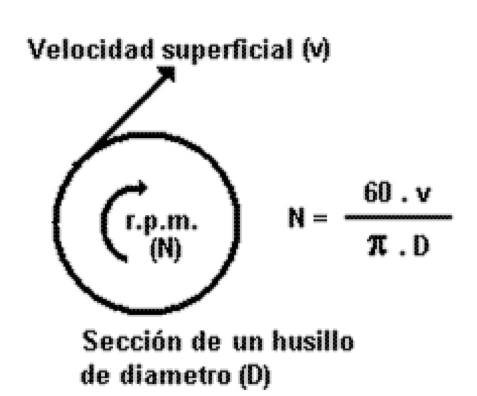


Las zonas de alimentación, compresión y dosificación tienen una longitud de 10,5 y 5.

- Relación de compresión 2 - 2,5 para amorfas y de 3 - 4 para cristalinas.



Para algunos materiales se recomiendan diseños especiales de husillo. El caso más representativo es el PVC. Este material es sensible a la degradación por cizalla. Por ello, se recomienda usar un husillo sin zonas de alimentación ni dosificación. De esta manera, el 100 % de la longitud del husillo es compresión, de modo que se aporta la cizalla necesaria para fundir el material de la forma más gradual posible. Otra recomendación para el PVC es emplear un husillo sin vávula antirretorno, para evitar la degradación del material en puntos muertos.



En condiciones de proceso, el husillo no debe sobrepasar las máximas velocidades lineales recomendadas por el suministrador. La máxima velocidad periférica utilizada suele depender de cada polímero. La relación entre el diámetro del husillo y las r.p.m. es:

La tabla muestra para diversos polímeros su velocidad superficial máxima, a partir de la cual se produciría su degradación por cizalla excesiva:

Polímero	Vel. superf. máx (mm/s)
GPPS (PS)	950
HIPS	900
ABS	650
SAN	450
LDPE	750
HDPE	800
PP	850
PPVC	200
UPVC	200
PA-6	500
PA-66	500
PMMA	400
PC	500
POM (copol.)	500
POM (homopol.)	300
PET	400
PBT	350
CA	500
PPO-M	500
PPS	300



Los husillos suelen desgastarse debido a la rotación y al posible contacto con materiales abrasivos, como las resinas cargadas con fibra de vidrio. El husillo debe resistir el desgaste, la corrosión y los esfuerzos de torsión. Suelen emplearse aceros aleados, como el 4140, con el que la dureza suele ser de RC50.

El desgaste del tornillo hace que la holgura entre el husillo y el cilindro aumente, y disminuya la capacidad de plastificación de la máquina. Para aumentar su resistencia, se emplean varias técnicas:

- Se pueden aplicar sobre el filete, por soldadura, aleaciones resistentes al desgaste (capa de unos 1,5 mm). Las más comunes son Estelita y Colmonoy.
- Se puede nitrurar el husillo.
- Se croma el tonillo (HRC 68). Este proceso aumenta también la resistencia a la corrosión del tornillo.

En cualquier caso, hay que recordar que el *tornillo se construye siempre más blando que el cilindro*, para que sea aquél el que se desgaste.



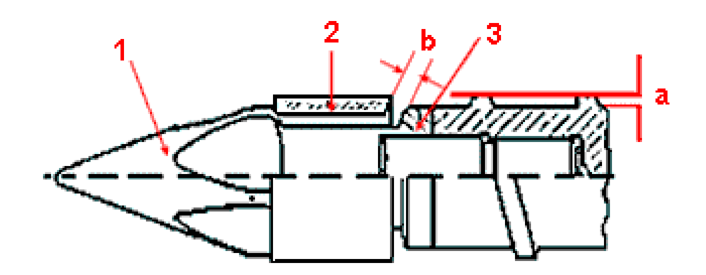
Válvula antirretorno

La válvula antirretorno está colocada en el frente del husillo y su función consiste en evitar que el material almacenado en la parte delantera del cilindro vuelva hacia atrás durante la fase de inyección empujado por la presión. Las válvulas antirretorno se usan con todo tipo de materiales. La mayor excepción para termoplásticos es el UPVC, donde la presencia de la válvula causaría problemas de degradación.

La válvula antirretorno más común es la de anillo o "ring check valve". Durante la carrera de plastificación, el anillo deslizante es empujado hacia delante contra la puntera, dejando abierto el paso de material. Durante la inyección, es empujado contra el asiento de la válvula por la presión del material, sellando el paso hacia el canal del husillo.

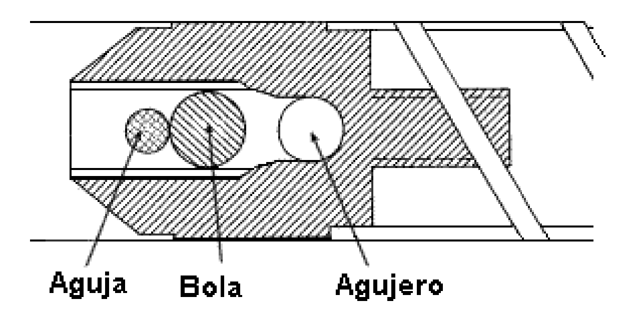
La holgura entre la válvula y el cilindro suele ser 0,01 · D. Para mejorar la resistencia, se utilizan válvulas y asientos de recubrimientos bimetálicos con alto contenido en cromo.

La figura nos muestra una válvula de este tipo.



El paso "b" suele ser 1 mm. mayor que la profundidad del filete del tornillo, "a". El paso entre el anillo deslizante y el vástago suele ser mayor que "b". La distancia entre los puntos 1 y X deja un área de paso de material suficiente para no restringir el flujo.

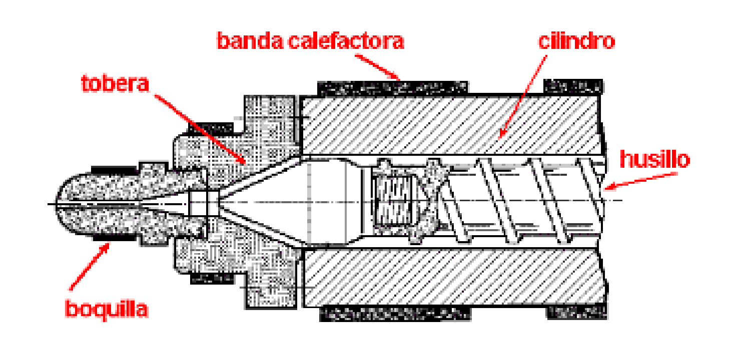
La alternativa a este tipo de válvula son aquellas que utilizan bolas para cerrar el camino de flujo del material durante la inyección. El problema de todos los diseños de válvulas de bolas es que son más caras, y el flujo no es tan bueno como en las otras ya que puede haber estancamiento.





Boquilla

La boquilla se localiza en la parte frontal del cilindro y su misión es conectar el cilindro con la entrada al molde. Se distinguen dos tipos de boquillas:



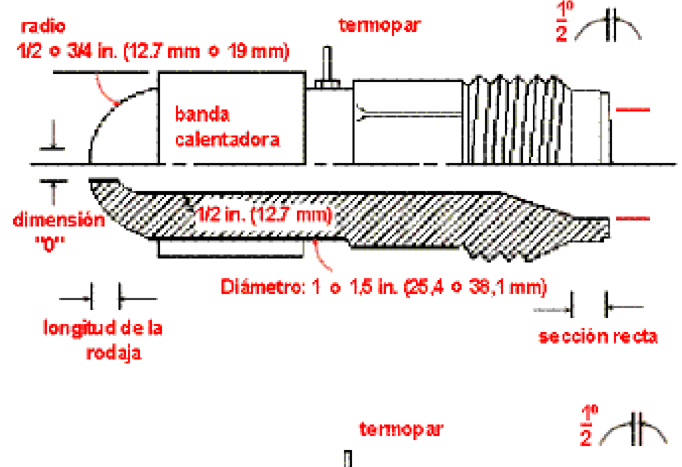
- boquillas abiertas.
- boquillas cerradas.

Boquillas abiertas

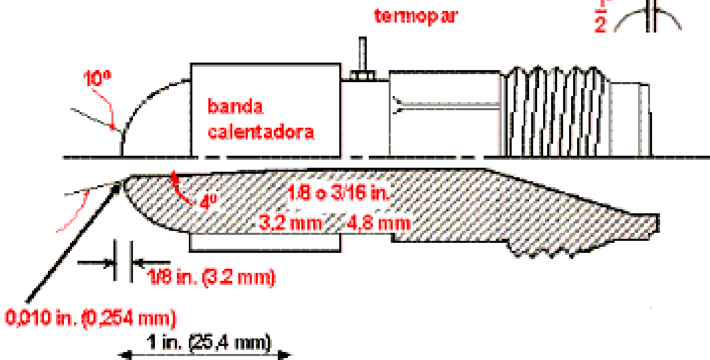
El tipo abierto es usado siempre que es posible, ya que es más simple, seguro y presenta menores riesgos de degradación del polímero por cizalla o puntos muertos.

En la figura siguiente se muestra una boquilla abierta estándar. La longitud de salida (land length) debe ser lo más pequeña posible porque queda unido al bebedero que se extrae junto a la pieza, pero compatible con la resistencia de la boquilla ya que es lo que apoya contra el molde.

El diámetro de este orificio debe ser algo menor que el de entrada al bebedero para poder extraer la pieza sin problemas. El diámetro interno de la boquilla debe ser de unos 12,5 mm y presentar una transición cónica para adaptarse al diámetro de la tobera del cilindro. Se deben evitar diseños que originen zonas donde el material quede estancado ya que esto provoca la degradación del mismo.



Las poliamidas presentan el problema de goteo por la boquilla debido a su gran fluidez. En la siguiente figura se muestra una boquilla abierta especial para poliamidas con conicidad invertida, desarrollada por DuPont. Con un buen control de temperatura, proporciona un desmoldeo limpio de la mazarota. La mazarota rompe en el extremo de menor diámetro del cono de 4º.



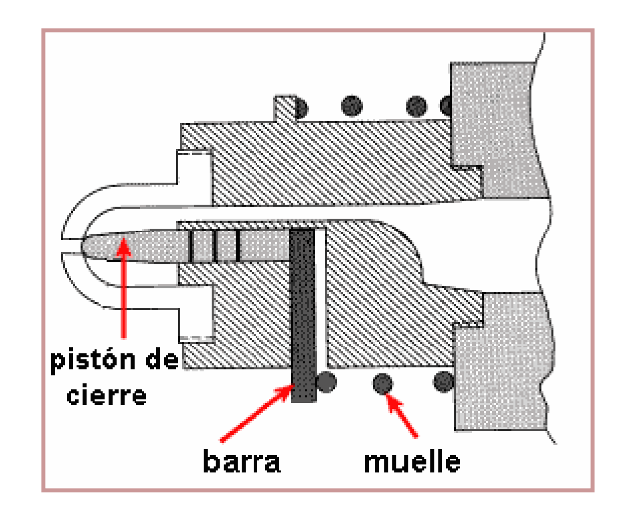
Boquillas cerradas

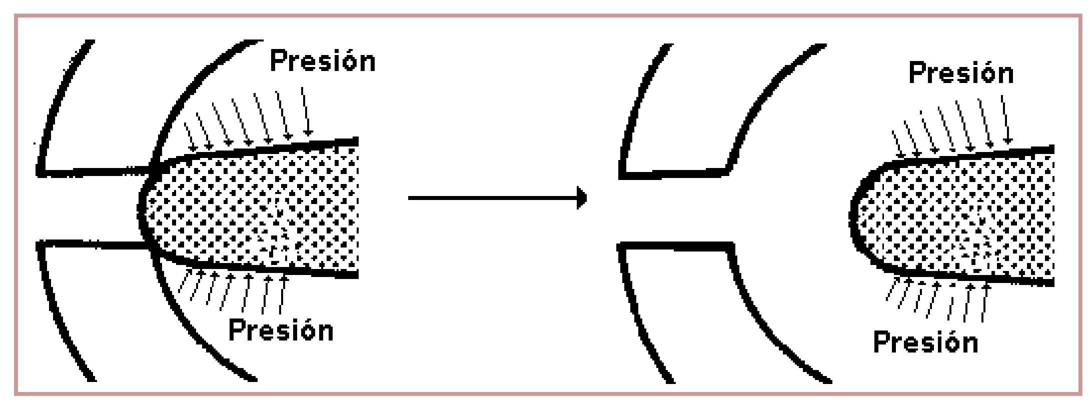
Son necesarias si se debe plastificar cuando el molde está abierto. Ello puede reducir tiempos de ciclo en piezas gruesas de materiales cristalinos. Estas piezas requieren altos tiempos de mantenimiento o 2ª fase y, por su volumen, largos tiempos de plastificación.

Hay dos tipos:

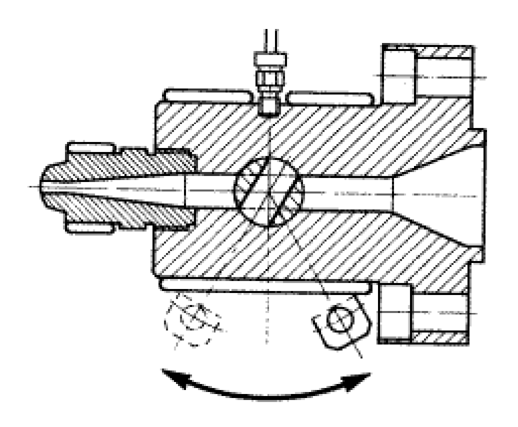


► *Con válvula antirretorno cerrada por muelle* (externo o interno) y que se abre por la presión del plástico, que da lugar a una fuerza perpendicular a la superficie del cierre, cuya componente horizontal lo hace retroceder. Puede dar lugar a problemas de degradación con ciertos materiales (aumenta el tiempo de residencia por zonas de retención).

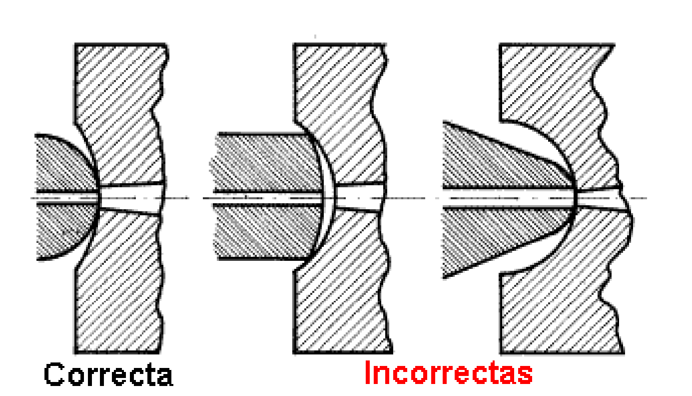




► *Con válvula accionada por un cilindro neumático*. Es el sistema más utilizado. No se recomienda utilizar sistemas de actuación hidráulicos para evitar la presencia de aceite en esta zona debido a posibles perdidas en las mangueras (peligro de incendio).



El asiento de las boquillas en el manguito del bebedero debe ser correcto, es decir alineado, que permita el desmoldeo de la mazarota y que sea estanco para que no escape material. Un mal asiento provoca la pérdida de material y su degradación, dañando la resistencia de la boquilla, además de producir piezas defectuosas.



El primer caso es correcto porque tiene un buen asiento con el molde y el diámetro de la boquilla es menor que la del bebedero. El segundo caso es incorrecto por tener un mal asiento y el tercer caso porque el diámetro es mayor.



El control de temperaturas de la boquilla es muy importante. Si es muy corta muchas veces el calor transmitido por conducción desde el cilindro es suficiente, pero generalmente son largas y requieren un calentamiento externo por medio de resistencias, que deben ser controladas independientemente de las del cilindro. Una temperatura excesiva puede degradar el material y una baja taponar la boquilla. Las resistencias de boquilla tienen una vida relativamente corta debido al abuso mecánico a que se las suele someter y al contacto con plástico degradado.

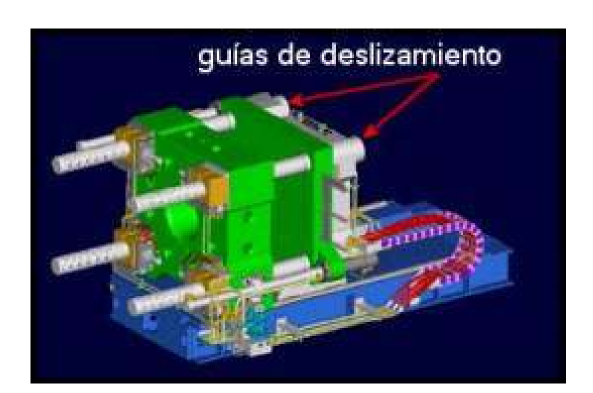
Como ya se ha visto las boquillas se acoplan al cilindro por medio de una rosca. Es importante lubricarla con una pasta antigripaje a base de grafito, cobre o similares y apretarla y soltarla siempre en caliente. Además es importante que el asiento con la tobera sea correcto y no de lugar a zonas de estancamiento del material.

La temperatura de la boquilla no es exactamente la de inyección del material por dos razones; una de ellas es porque el termopar mide la temperatura del metal, no del plástico y otra porque durante la inyección al pasar el plástico por el orificio de salida de la boquilla se produce siempre un aumento de la temperatura debido a la fricción. Una forma de conocer la temperatura de inyección aproximada es realizar una inyección en las mismas condiciones que las reales pero "al aire" con la unidad de inyección debidamente atrasada, recojer el material con cuidado de no quemarse en un recipiente no metálico (por ejemplo una caja de madera) y hundir rápidamente en la masa recogida una sonda de temperatura que tenga una respuesta rápida.

Guiado de la unidad de inyección

Para el guiado de la unidad de inyección se emplean barras y guías de deslizamiento. La velocidad de desplazamiento de la unidad de inyección es de 20 - 40 cm / s y la fuerza de contacto entre la boquilla y el molde depende del tamaño de la máquina (ver tabla).

FUERZA DE CIERRE (Ton)	FUERZA DE CONTACTO (Ton)
< 50	5 - 8
50 - 100	6 - 9
100 - 500	17 - 22
500 - 1000	22 - 28





Hoja de especificaciones de las máquinas de inyección Sandretto serie Otto 150										
		SERIE OTTO A.T.150 t								
Clasificación EUROMAP	cm^3/ MP	430 / 150			612 / 150			790 / 150		
Diámetro del husillo	mm	40	45	50	45	50	55	45	55	60
Volumen de inyección calculado	cm^3	226	286	353	318	392	475	366	546	650
Longitud útil del husillo	L / d	23,6	21	18,9	23,3	21	19	25,6	21	19,2
Capacidad de inyección máxima	cm^3/ 1"	123	156	193	156	193	234	186	277	330
Capacidad de plastificación	g / 1"	18,2	24,5	31,8	26,4	34,3	43,6	22,8	37,5	47,3
Presión sobre el material	bar	1.900	1.500	1.215	1.926	1.560	1.290	2.160	1.450	1.215
Par de motor cilindrada variable	Nm	1.160 ÷ 425			1.160 ÷ 425			2.125 ÷ 772		
Velocidad del husillo	RPM	153¸418			197¸536			149¸410		
Potencia motor hidraulic. Husillo	HP	25			30			40		
Carrera grupo inyección motor	mm	370			370			370		
Zonas termorreguladas (+boquilla)	Nº	3 ÷ 1			3 ÷ 1			4 ÷ 1		
Potencia total calefacción	kW	10,5			12,8			14,3		
Forza bloqueo molde	kN	1.470			1.470			1.470		
Grueso del molde mín. / máx.	mm	155 ÷ 560			155 ÷ 560			155 ÷ 560		
Carrera plano móvil	mm	500			500			500		
Dimensiones planos	mm	690 x 690			690 x 690			690 x 690		
Pasaje de las columnas (O x V)	mm	460 x 460			460 x 460			460 x 460		
Diámetro de columnas	mm	85			85			85		
Fuerza extracción	kN	50			50			50		
Carrera extractor	mm	160			160			160		
Ciclos en vacío (max/Euromap)	n / 1"	43 / 33			43 / 33			43 / 33		
Presión circuito oleodinámico	Bar	135			135			135		
Capacidad de aceite	l	290			290			290		
Se precisan frigorias para refrigerar el aceite	frig / h	6.400			7.680			8.960		
Se precisa H_2O para refrigerar el aceite	m^3 / h	0,64			0,77			0,9		
Potencia del motor eléctrico	kW	18,5			22			30		
Potencia total instalada	kW	29			34,8			44,3		
Dimensiones de bulto	mt	6,16 x 2,08 x 15			6,36 x 2,08 x 15			6,73 x 2,1 x 15		
Peso neto total	kg	6.600			7.000			7.200		
Peso máx. molde aconsejado	kg	520			520			520		
Peso máx. molde (aconsejado)	kg	780			780			780		
Diámetro mín. molde (aconsejado)	mm	390			390			390		



Secado

Todos los materiales plásticos absorben humedad en mayor o menor cantidad. La humedad en la pieza puede causar defectos visuales o pérdida de propiedades, por lo que en estos casos será necesario secar la pieza.

1.- Materiales que no precisan secado.
En este grupo están las poliolefinas (PE y PP), PS y PVC. Las moléculas de estos materiales absorben muy poca humedad, por lo que no hay humedad dentro del gránulo. Sólo puede aparecer humedad superficial debido a la condensación sobre el gránulo de humedad ambiental, en el caso de que se den las condiciones para ello. El POM puede moldearse sin secar si se procesa nada más abrir el saco.

2.- Materiales que precisan secado.
Dentro de este grupo podemos distinguir entre los materiales que precisan secado para evitar defectos visuales en la pieza moldeada y aquellos que precisan ser secados para evitar la hidrólisis.

a) Materiales higroscópicos.
En este grupo se incluyen ABS, SAN, PMMA y nylon. Las moléculas de que se componen estos materiales tienen cierta afinidad por el agua, y el agua se absorbe dentro del gránulo a nivel molecular. Ello significa que el agua no está dispersada dentro del material en forma de gotas, sino que las moléculas de agua están mezcladas con las moléculas de material, siendo más difícil de eliminar. En general, se admite que si el contenido de humedad en el material es inferior al 0,2 %, el efecto de la humedad sobre la pieza moldeada apenas es apreciable. En cualquier caso, si se requieren piezas de alto brillo de alta transparencia (p.e. con PMMA), es necesario secar el material hasta contenidos de humedad inferiores al 0,1%.

b) Materiales hidrolizables.
En este grupo se encuentran los poliésteres (PET, PBT) y el policarbonato (PC). También podría incluirse el nylon, pero este material es más resistente a la hidrólisis que los anteriores, y los defectos visuales se hacen patentes antes que aquellos debidos a la hidrólisis.

Estos materiales sufren hidrólisis (rotura de las cadenas) en presencia de calor y humedad. Por ello es necesario secarlos hasta contenidos de humedad inferiores al 0,02 %.

En la etapa de procesado, la pérdida de peso molecular se manifiesta como un aumento de la fluidez del material. Respecto a las propiedades mecánicas, aumentan la fragilidad de la pieza y se reduce la resistencia a la fluencia.Así, cuando el PC se inyecta húmedo, el aumento de fluidez puede sobrecompactar las piezas, lo que aumenta su tendencia a quedarse "agarradas".


Camisetas de poliéster

Este efecto, combinado con la pérdida de tenacidad, hace que la pieza pueda romperse al ser empujada por los expulsores en la etapa de desmoldeo o extracción.

La hidrólisis es tanto más rápida cuanto mayores son la temperatura y la humedad.

Procesar una resina húmeda puede dar piezas con neblina o ráfagas plateadas en las piezas moldeadas.

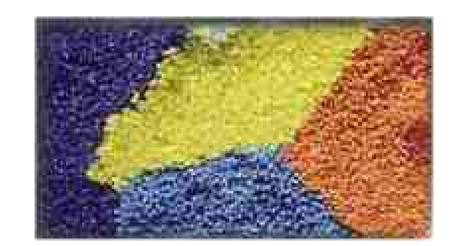


Manipulación del Material

El material suministrado viene envasado en sacos. En principio, se suministra seco, de manera que sería posible procesarlo sin necesidad de secarlo. Sin embargo, los sacos rara vez son herméticos, por lo que el material absorbe agua durante el almacenaje. Por ello, los materiales higroscópicos deben ser secados. Además, deben tomarse ciertas precauciones en su manipulación:

En primer lugar, si el material ha estado almacenado a una temperatura menor que la de la zona de inyección (lo que es usual), deben llevarse los sacos a esta zona y esperar a que el material se atempere antes de abrir los sacos. De lo contrario puede haber condensación sobre superficies frías. Este fenómeno se da si la temperatura de punto de rocío del aire en la zona de inyección es superior a la temperatura a la que se encuentra el material.

Suponiendo que el material está seco, se dispone de un tiempo limitado para procesarlo antes de que absorba humedad. Este tiempo depende de las condiciones ambientales (T y HR) y del plástico en cuestión. En general, los materiales hidrolizables (PC, PBT y PET), que son los que se deben procesar más secos, son los que antes alcanzan su grado de humedad máximo recomendado, por lo que se deben secar en la propia máquina. Los demás materiales permiten disponer de más tiempo y admiten un secado centralizado.





Métodos y equipos de secado

La manera más simple y efectiva de secar el material es utilizar el aire, debido a la capacidad de éste para absorber agua, en unas condiciones determinadas según sea el plástico a secar.

En cuanto a la temperatura del aire de secado debe ser la más alta admitida por el plástico sin que este se degrade. A igualdad de HR cuanto mayor sea la temperatura del aire de secado menor será el tiempo necesario para secar el material.

Existen varios métodos de secado cada uno de ellos con un equipamiento específico:

- Estufas
- Secadores
- Deshumificadores
- Secadores de vacío
- Cilindros ventilados



Tolva secadora

Métodos y equipos de secado

Estufas

El aire del ambiente es calentado y circula sobre el material que se encuentra colocado sobre unas bandejas. En general, se recomienda que la altura del material situado en las bandejas no supere los 5 cm.



El sistema es económico, y pueden secar varios tipos de materiales diferentes a la vez (siempre que sus temperaturas de secado sean similares).

Como desventajas tenemos las siguientes: la capacidad de secado es limitada y depende de las condiciones ambientales, se pierde energía a la atmósfera, el funcionamiento es por lotes y existe el peligro de que se mezclen los materiales.



Secadores

Similar a las estufas pero sólo pueden secar un polímero cada vez. Normalmente alimentan a una sola máquina vía una tolva alimentadora de vacío, pero pueden ser parte de un sistema centralizado de suministro de material para varias máquinas.

Son baratos, pero su funcionamiento resulta caro ya que el calor se pierde a la atmósfera. Como en el caso de las estufas su potencial de secado está limitado por la humedad ambiente (ver tabla):

Temperatura (°C)	Peso de H_2O para saturación
20	14,7
35	36,6
85	547

Ejemplo:

Si tengo que secar la resina a 85 ºC, y empleo aire saturado cuando la temperatura ambiente es de 20 ºC, la HR del aire empleado será:

HR = (14,7 / 547) · 100 = 2,7 %

Si empleo aire saturado a 35 ºC, su HR será: HR = (36,6 / 547) · 100 = 6,7 %. Por ello, es más difícil secar las resinas en verano.

En general, las estufas o secadores sólo son aptas para eliminar el agua condensada en la superficie del material, puesto que el punto de rocío en estos sistemas puede no ser lo suficientemente bajo como para lograr el grado de secado requerido en aplicaciones críticas de materiales higroscópicos. Su aplicabilidad se reduce a materiales como PE, PP, PS y PVC, siempre que no estén cargados con aditivos higroscópicos, como el negro de humo.

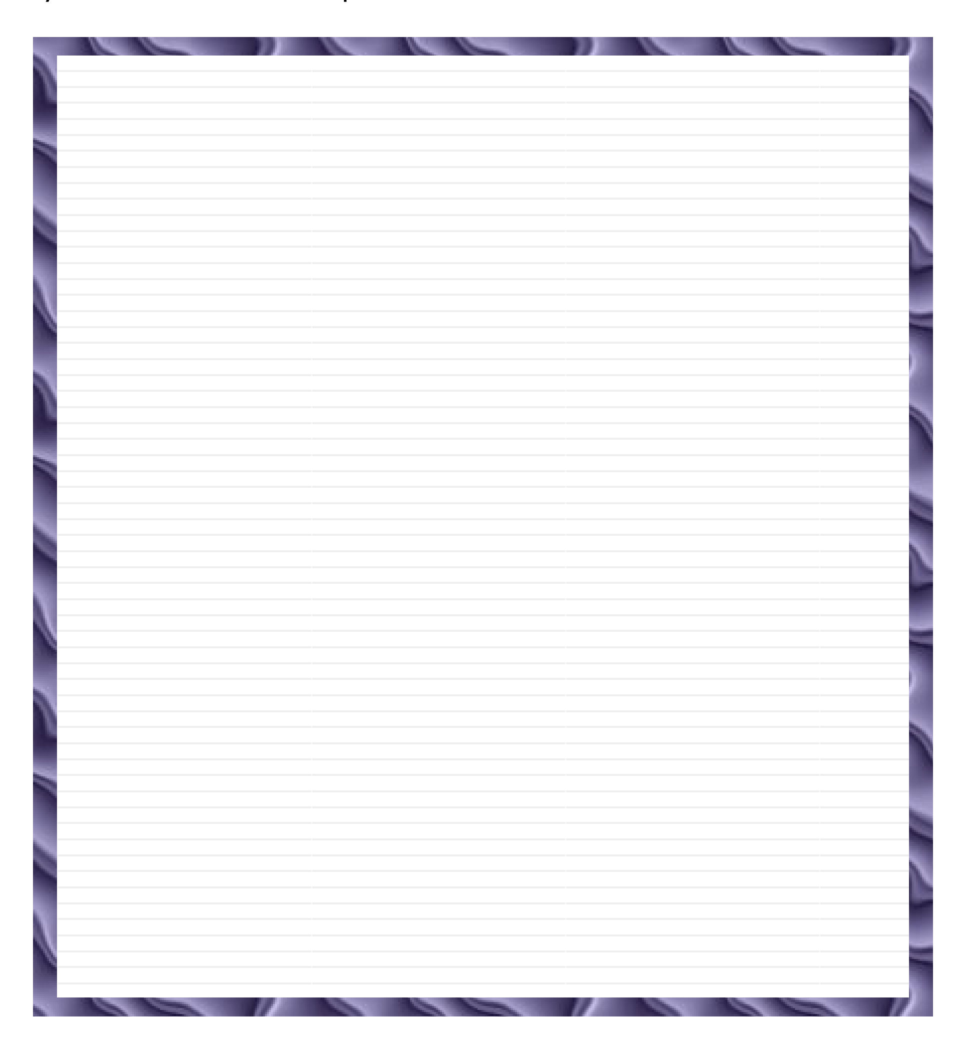


Secador de pala



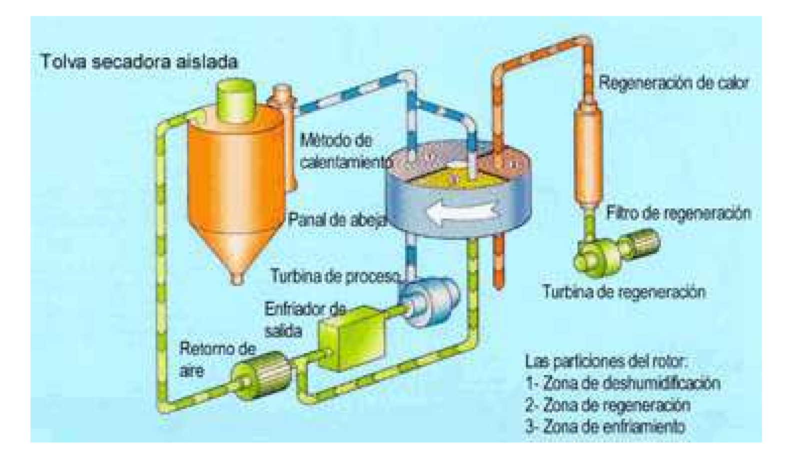
Deshumidificador

Son similares en apariencia a los secadores de aire caliente. Calientan el aire y a la vez lo secan haciéndolo pasar por un lecho de sílica gel antes de hacerlo circular a través del material. El lecho de sílica gel es regenerado automáticamente a intervalos regulares quedando listo para un nuevo uso y debe ser cambiado periódicamente.



Tras atravesar la tolva, el aire pasa por un filtro que elimina las partículas de polvo que pudieran desactivar el tamiz molecular. El aire pasa por un enfriador puesto que los tamices moleculares sólo son efectivos si la temperatura es inferior a 60 ºC. Una soplante impulsa el aire a través de la torre de proceso, donde el agua es absorbida por el tamiz molecular, de manera que a la salida alcanza el punto de rocío deseado. Un calentador situado a continuación lo calienta hasta la temperatura de secado programada. Para piezas que requieran una alta calidad óptica, es aconsejable situar un filtro antes de la entrada a la tolva para evitar impurezas provenientes del tamiz o de las resistencias calefactoras.

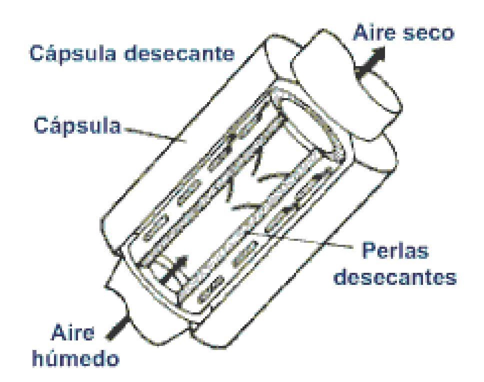
Cuando la torre se satura debido a que se ha agotado el poder absorbente de los tamices moleculares, se produce el cambio de torre. La torre que estaba en proceso pasa a la fase de regeneración y viceversa cuando la válvula de cambio gira 90 º. El cambio puede ser comandado por un temporizador o mediante un dispositivo que controle el Dew - Point o punto de rocío del aire que está siendo utilizado en el proceso.



Para regenerar el tamiz saturado, se absorbe aire del exterior, se filtra y se calienta hasta 300 ºC. Este aire calienta el tamiz a altas temperaturas, de manera que el agua absorbida se desborde y es arrastrado al exterior.



Cápsula desecante.



Entre las ventajas están las siguientes: el funcionamiento es más económico ya que el aire circula en circuito cerrado, y se pierde menos calor a la atmósfera. Se alcanzan mayores grados de secado, sin que influyan las condiciones ambientales. Además, pueden montarse encima de las máquinas, proporcionando un suministro continuo de material seco.

Su único inconveniente es que son más caros que las estufas o los secadores.

Secadores de Vacio



Son unos contenedores en los cuales el material puede ser sometido a vacío y temperatura con el objeto de ser secado.

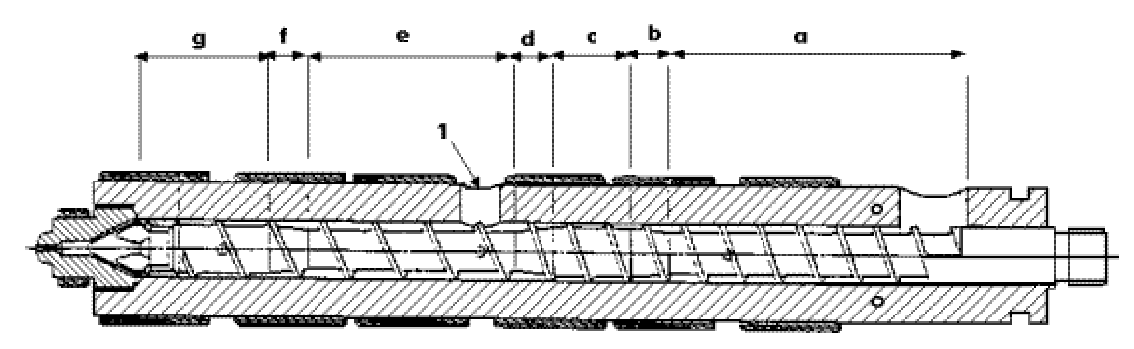
La principal ventaja es que el material que se está secando no se ve sometido a oxidación, lo cual es a veces un problema con nylons de color natural o de colores claros que adquieren una tonalidad amarillenta.

El inconveniente principal es que el material sólo se puede secar por lotes y por lo tanto no es posible una alimentación automática de las máquinas. También existe el riesgo de que el material pierda aditivos volátiles.



Cilindros Ventilados

También denominados con desgasificación. Consisten en un husillo y un cilindro especialmente diseñados en los cuales el material es descomprimido rápidamente tras un calentamiento y compresión iniciales, permitiendo que se evaporen los volátiles a través de un orificio situado en el cilindro. El material seco es nuevamente comprimido y mezclado antes de pasar a la zona de medida del husillo.



Unidad de plastificación formado por un cilindro ventilado y un husillo de plastificación. El gas que genera el material es ventilado a través del agujero que se indica con el número 1.
a) Sección de alimentación. b) 1ª sección de compresión. c) 1ª sección de laminación. d) Sección de compresión. e) Ventilación. f) 2ª sección de compresión. g) 2ª sección de laminación.

Como ventajas, mencionar que el material se puede utilizar en la máquina de forma inmediata, ya que el secado previo es innecesario, y el problema de oxidación debido a una sobre-exposición a altas temperaturas es eliminado.

En general, se recomienda no emplear este tipo de equipos, ya que presentan serios inconvenientes. Por ejemplo, no se deben usar con materiales susceptibles de hidrólisis (PC, PET y PBT). Además, material puede perder aditivos volátiles por el orificio de ventilación y los tiempos de residencia y la degradación son mayores que en máquinas convencionales.



Control del proceso con Deshumidificadores

Preferiblemente, los deshumidificadores debieran estar montados directamente sobre la máquina de inyección, para evitar que la resina reabsorba humedad. Hay que tener en cuenta que la resina comienza a absorber humedad en cuanto se pone en contacto con el ambiente. En un día húmedo, los tiempos de exposición máximos son del orden de 3 - 5 minutos para materiales hidrolizables (PET, PBT y PC) y de 15 - 30 minutos para materiales higroscópicos. Deben evitarse las líneas de transferencia que empleen aire ambiental y la tolva debe estar tapada.

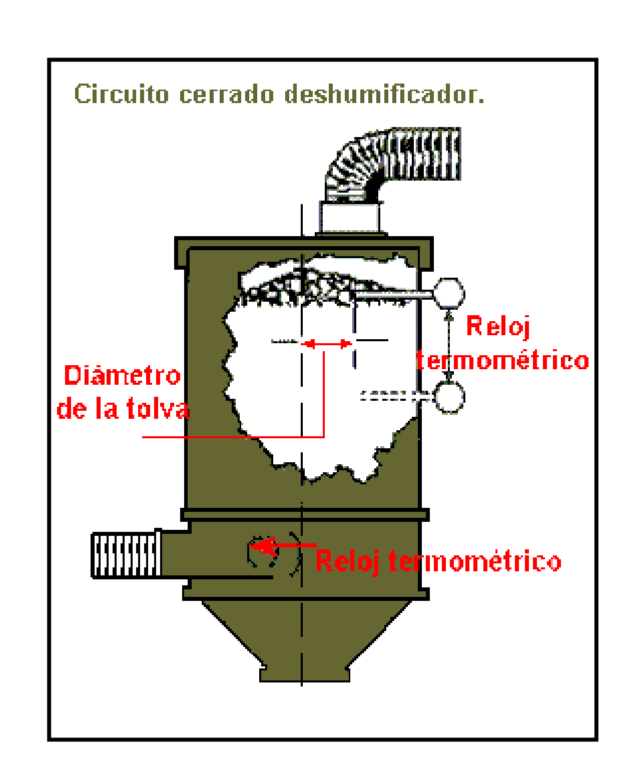
Para lograr velocidades de secado óptimas, la temperatura de entrada del aire debiera ser la especificada en el catálogo de material. Dependiendo del diseño particular del desecador y de la situción del termopar, la entrada puede estar más fría que lo programado. Para garantizar la temperatura de entrada apropiada, se debiera situar un termopar calibrado en la entrada de la tolva. Debido a las pérdidas de calor en la manguera, será necesario programar una temperatura de secado superior.

Algunos controladores de temperatura tienen amplias oscilaciones. Puesto que una temperatura excesiva de la granza puede causar apelmazado, la temperatura de seguridad a programar resulta ser una temperatura "promedio" de secado baja, y por tanto una velocidad de secado baja. Para evitar esta situación, el controlador debiera ser capaz de mantener la temperatura del aire con una oscilación de ± 2 ºC.

La tolva debe ser del tamaño requerido en función de la cadencia de la máquina y del tiempo de secado requerido. Si una máquina procesa 10 kg / h de material y el tiempo de secado es de 3h, la tolva debiera ser de unos 30 - 40 kg de capacidad.

El caudal de aire es también una variable de gran importancia. Si es bajo, habrá un gradiente de temperatura importante de la parte inferior a la superior del desecador. De este modo, la temperatura de la granza a partir de cierta altura de la tolva puede ser demasiado baja para posibilitar el secado. Así, el "tiempo de residencia en caliente" real puede ser insuficiente para lograr un secado adecuado.

La mejor manera de controlar el flujo de aire es situar un reloj termométrico dentro de la tolva a 30 cms de la cima del lecho de granza y a una distancia respecto del centro igual a la mitad del radio de la tolva (ver la figura). Con un flujo de aire adecuado, la temperatura del aire no debiera caer más de 15 ºC respecto a la temperatura de la entrada.



Por último, para obtener el máximo rendimiento posible, es importante buscar y reparar posibles fugas en el circuito de aire seco, especialmente las de succión que pueda haber en los autocargadores inactivos, y mantener limpios los filtros (inspeccionarlos diariamente).



Recomendaciones de secado para algunas resinas

		ESTUFA AIRE CALIENTE O SECADOR		DESHUMIDIFICADOR	
MATERIAL	**ABSORCIÓN DE AGUA (%) EN 24 HORAS (20°C Y 50% H.R.)**	**TIEMPO (horas)**	**TEMPERATURA (°C)**	**TIEMPO (horas)**	**TEMPERATURA (°C)**
ABS	0,2 - 0,35	2 - 4	80 - 85	1 - 2	80
SAN	0,25	3 - 4	70 - 75	1,5	85 - 90
ASA	> 0.1	2 - 4	80 - 85	2 - 3	90
PMMA	0,3	2 - 4	75	3 - 4	90
NYLON	2,5 (PA6)	10 - 14	80	4 - 5	75
Si está muy húmedo secar al vacío 12 horas a 105 grados centígrados					
PC	0,18	4*	120*	2 - 3	120
Almacenar en tolva cubierta y calentada a 80 grados centígrados					
PBT	0,2	6 - 8	120	2 - 4	150
PET	0,2	4*	135*	4	165
* Se recomienda no secar con estufa de aire caliente					
PS	0,08	3	70	1 - 2	70
No necesario a no ser que esté muy húmedo					
SB	0,08	1	60	0,5	60
No necesario a no ser que esté muy húmedo					
POM	0,22 - 0,4	2 - 3	85	1 - 2	110
No necesario a no ser que esté muy húmedo					
CA	2,2 - 6	3 - 4	55 - 85	1 - 2	85



Moldes de inyección. Introducción



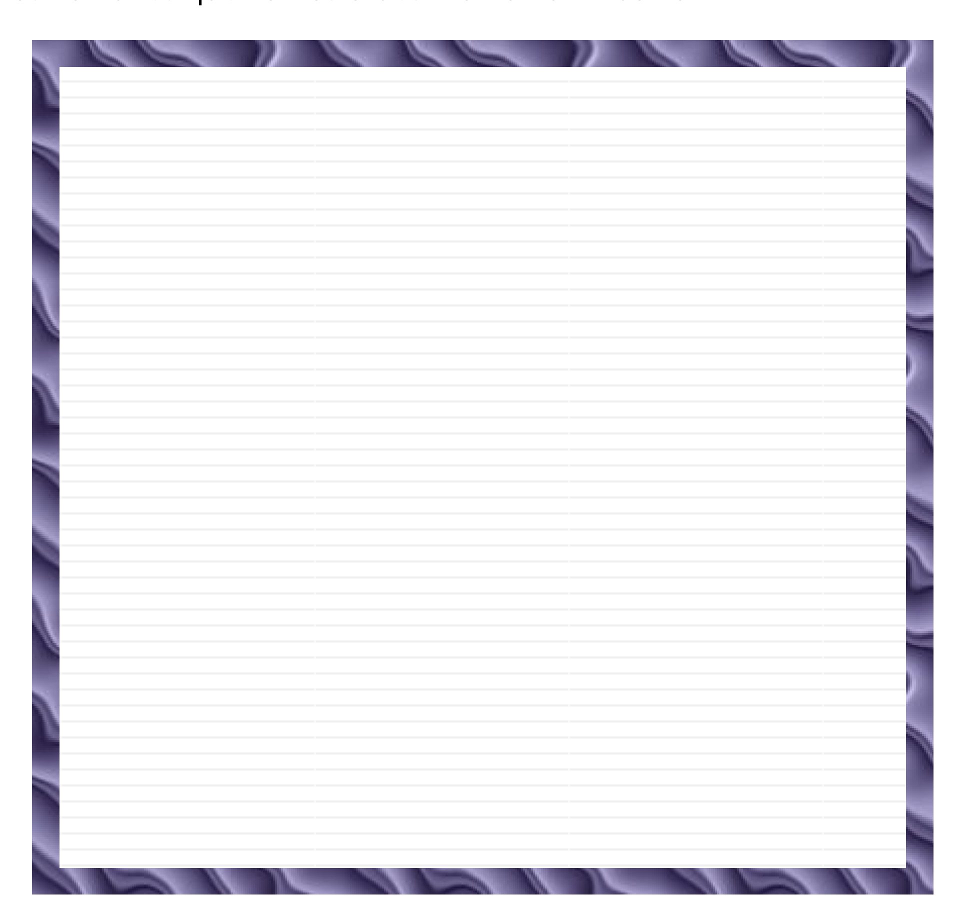
El molde de inyección es el utillaje que conforma el plástico. Sus cavidades reproducen el negativo de las piezas que se quieren obtener. El plástico fundido es introducido a presión en el molde por un orificio, distribuido por una serie de canales de alimentación y conducido finalmente a las cavidades, donde se solidifica y adquiere la forma deseada. Consta de dispositivos de expulsión para permitir su desmoldeo y de canales de refrigeración para conseguir una temperatura de molde homogénea y uniforme en el tiempo, así como para poder reducir la duración del ciclo de moldeo.

La calidad del molde, su diseño y ejecución son factores fundamentales para obtener piezas de calidad. Un molde mal concebido o realizado dará lugar a piezas defectuosas y es poco o nada lo que puede hacer un inyectador con él para remediar esta situación. Por otro lado, un molde correctamente diseñado y fabricado no da buenas piezas por sí sólo. El inyectador debe encontrar las condiciones de moldeo (básicamente presiones, temperaturas, velocidades, dosis y tiempos) que permiten obtener piezas de la calidad requerida.



Elementos básicos de un molde

Existen varios tipos y configuraciones de moldes (una o varias cavidades, de dos placas, de tres placas, de varios pisos, con canales calientes, con carros...). Ahora bien, en todos ellos hay una serie de elementos comunes que vamos a describir a continuación:



1. Bebedero	**11.** Plato extractor
2. Anillo de centrado	**12.** Varilla de retención o espiga extractora de la mazarota
3. Placa superior de fijación	**13.** Tope
4. Placa fija portacavidades	**14.** Paralelas o espaciadores
5. Columnas-guía	**15.** Placa inferior de fijación
6. Casquillos-guía	**16.** Columnas soporte o de apoyo
7. Placa móvil portacavidades	**17.** Canales de refrigeración
8. Placa soporte o plato de apoyo	**18.** Caja del sistema expulsor
9. Placa de fijación de expulsores	**19.** Núcleo porta-macho
10. Espigas extractoras	**20.** Núcleo porta cavidad

Además de éstas existen otras partes del molde, tales como los canales de alimentación, entradas respiraderos, pozos fríos, mecanismos de extracción, etc. que se comentarán más adelante.

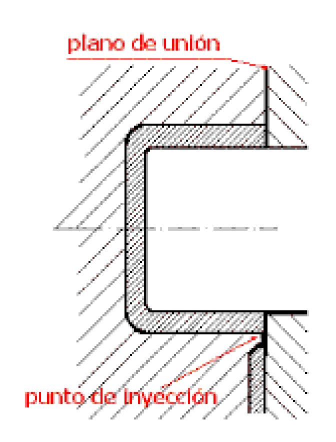


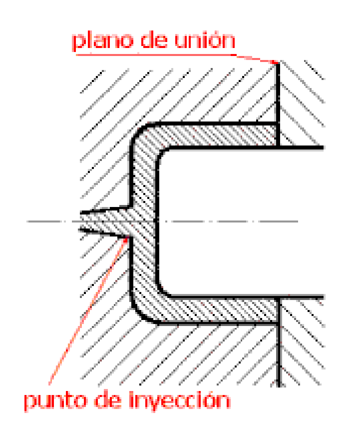
Superficie de unión

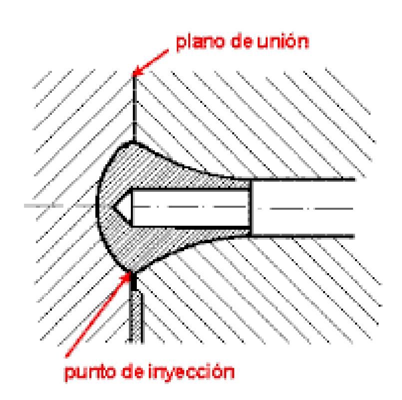
Comúnmente llamado plano de partición, partición del molde, partage.

En el moldeo por inyección la pieza reproduce fielmente la geometría y diseño del molde, así como cualquier defecto que pudiera existir en el mismo.

Evidentemente, la unión de las dos mitades de la matriz, por perfecta que sea, y aunque no permita la salida de la rebaba, dejará su huella en la pieza moldeada.
Por esta causa la superficie de partición deberá situarse de forma que las marcas que se produzcan sean lo menos visibles.







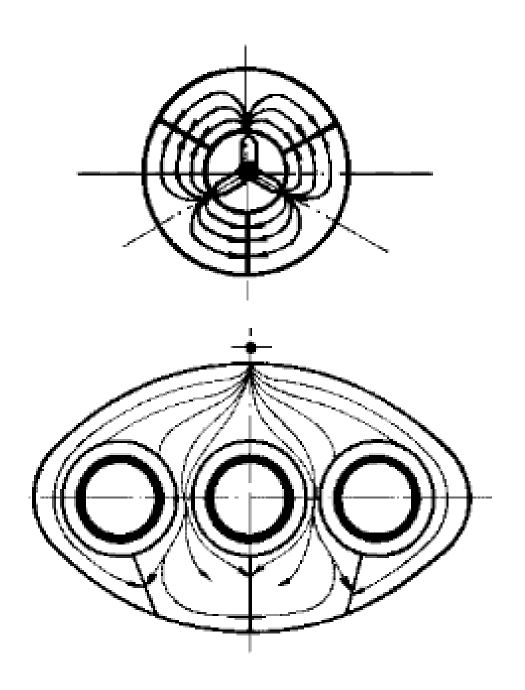


Puntos de inyección y líneas de soldadura

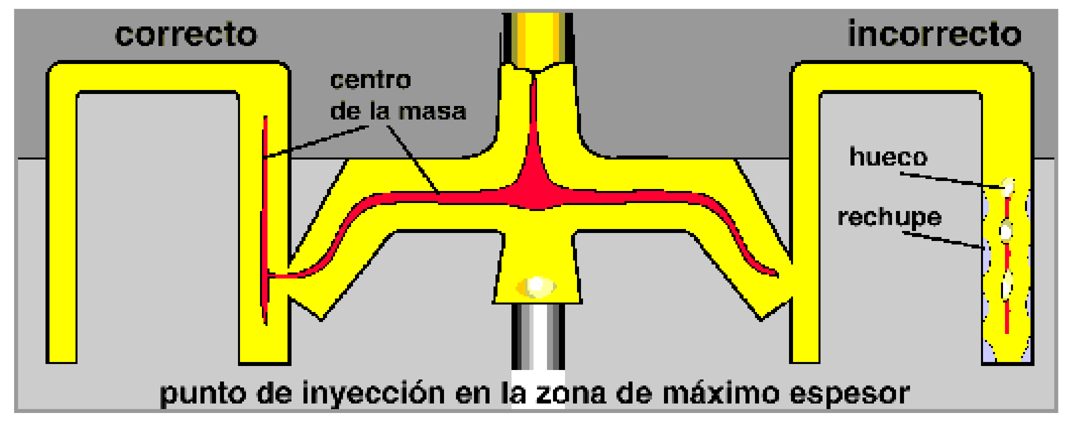
El punto de inyección es la abertura a través de la cual penetra el plástico fundido en la cavidad. La elección del punto de inyección es fundamental en el diseño del molde, ya que de su posición dependerán el recorrido y la distribución del material dentro del molde.

El disponer los puntos de inyección en una zona u otra de la pieza da lugar a patrones de llenado diferentes. A menudo en piezas grandes se necesitan varios puntos de inyección para poder llenar una cavidad debido a la gran longitud que debe recorrer el plástico para poder llenarla completamente. De todas formas siempre se procurará que el número de puntos de inyección sea el menor posible, que no provoquen la aparición de líneas de soldadura (que de todas formas son inevitables cuando hay un obstáculo que deba ser rodeado por el flujo) y que no se produzcan atrapamientos de aire. Si la pieza es de espesor variable se colocará en la zona de mayor espesor y si la pieza posee nervios finos con respecto a su espesor general se colocará el punto de inyección en una zona alejada de dichos nervios. También es deseable buscar unidireccionalidad en el flujo del material y que este flujo sea equilibrado, es decir que los "extremos" de la pieza se llenen en el mismo tiempo o si es un molde multicavidad que todas las cavidades se terminen de llenar en el mismo instante ya que de esta forma se evitan piezas sobrecompactadas con posibilidad de rebabas y variaciones en el peso de las piezas.

Cuando el flujo de material se ve roto por un obstáculo se produce una ramificación del mismo. Estas ramificaciones cuando se vuelven a unir generan las denominadas líneas de soldadura. Siempre que dos flujos se encuentran, se generan líneas de soldadura, por lo cual si una cavidad dispone de más de un punto de inyección es seguro que presentará líneas de soldadura. Lógicamente, si el material se ha enfriado demasiado o si la presión de la máquina es insuficiente, estas soldaduras son imperfectas y se aprecian notablemente en la superficie de la pieza. Las líneas de soldadura son puntos débiles de la pieza aparte de ser un defecto estético. Por tanto, cuando son inevitables hay que procurar que sean de buena calidad, que no se noten, que se produzcan en zonas no vistas de la pieza o en puntos donde no comprometan la resistencia mecánica de la pieza.

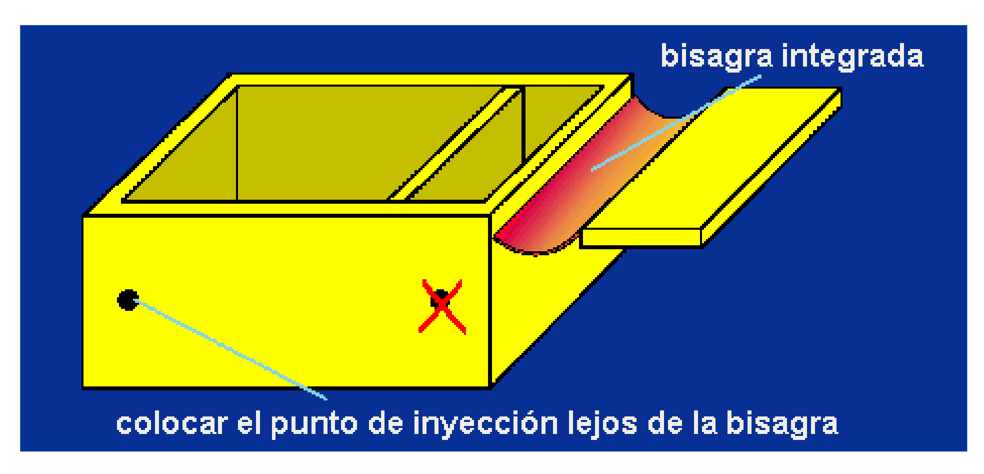


Ejemplos de localización del punto de inyección:

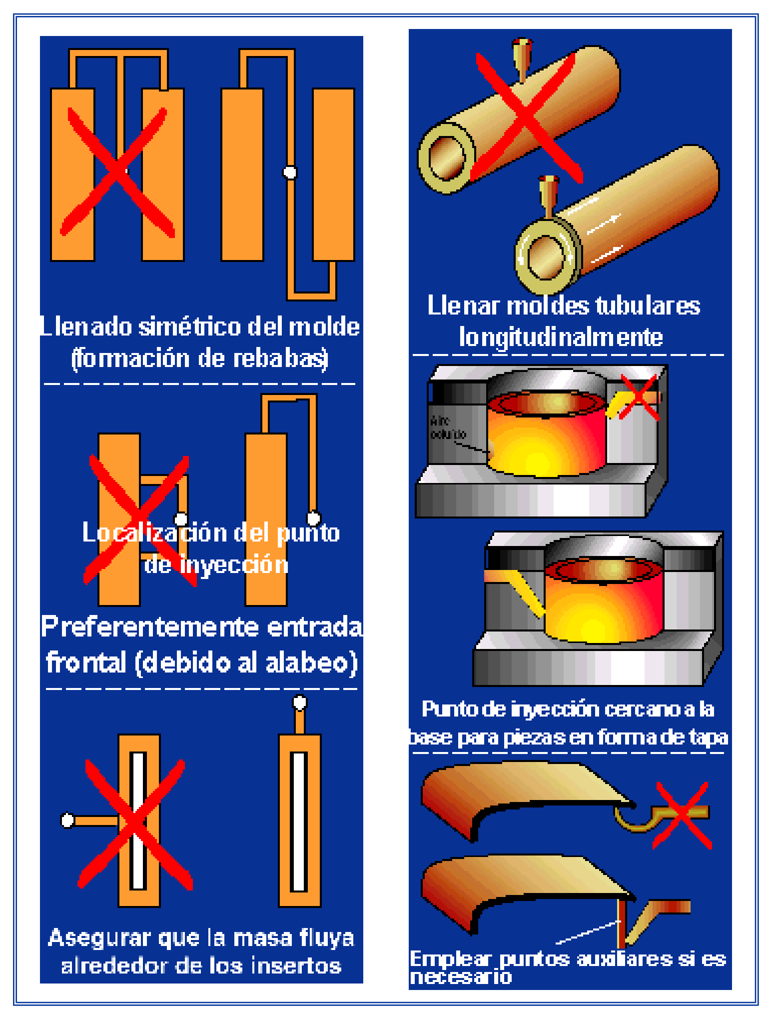


Sección justo antes del final de la fase de presión de mantenimiento.





Posición de la entrada cuando se integra una bisagra.

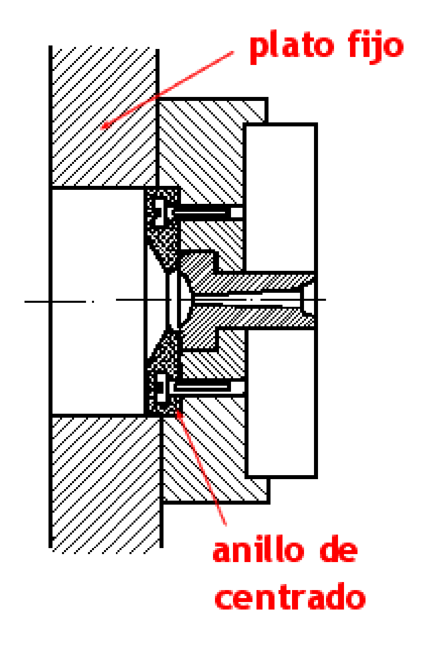


Localizaciones del punto de inyección.



Ajuste de centrado

A la hora de colocar el molde en la máquina es muy importante que el eje del cono del bebedero esté alineado con el eje de la boquilla.



Para conseguirlo se dota al molde de un anillo de centrado concéntrico con el eje del cono del bebedero y que resalta unos milímetros del plano de apoyo de la placa anterior del molde. A la vez, el plato portamoldes fijo -de la unidad de cierre de la máquina de inyección- tiene mecanizado un agujero que es concéntrico con el eje de la boquilla. El anillo de centrado debe tener el mismo diámetro que dicho agujero. Introduciendo el anillo por el agujero (con ayuda de una grúa) el molde queda centrado automáticamente.



Sistema de alimentación

El sistema de alimentación o llenado tiene como misión recibir el material de moldeo fundido que procede del cilindro de plastificación de la máquina y conducirlo hasta la(s) cavidad(es) del molde.

Este sistema consta fundamentalmente de las siguientes partes:

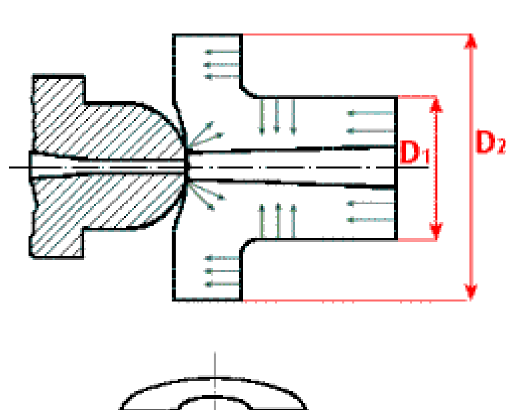
- Bebedero
- Canales de alimentación y distribución

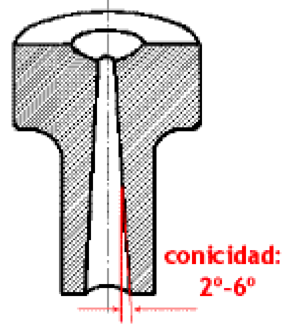

Canales de distribución

Sistema de alimentación

El bebedero

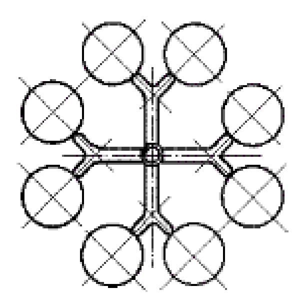
Tiene forma troncocónica y su diámetro menor es el que se enfrenta a la boquilla de la inyectora, debiendo ser este diámetro un 10 - 15 % mayor que el de la boquilla para permitir el desmoldeo. El bebedero se mecaniza en un manguito intercambiable para poder sustituirlo cuando se desgasta (tener en cuenta que sobre él se apoya la boquilla durante la inyección), debe ser templado y por dentro debe ir pulido brillante en el sentido del eje del cono. El contacto entre la boquilla y el bebedero puede ser plano, esférico o cónico. El tamaño debe ser lo más pequeño posible a fin de que el enfriamiento sea rápido y los ciclos cortos. Si por circunstancias de diseño debe ser grande, deberá disponer de un sistema de refrigeración para que la mazarota o bebedero no se desgarre al abrir el molde. El diámetro mayor del bebedero debe ser mayor que la suma de los diámetros de todos los canales principales. Es posible conseguir bebederos más cortos utilizando boquillas largas y manguitos modificados.





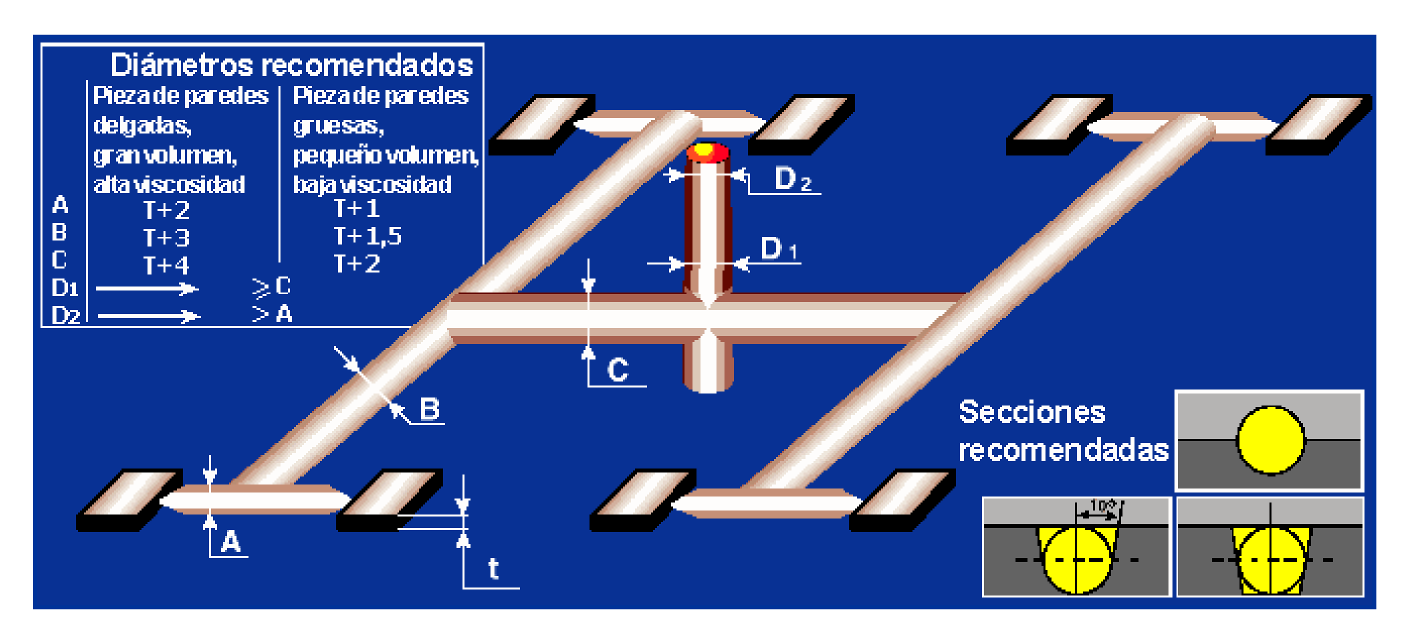


Los canales de alimentación o de distribución



Constituyen la parte del sistema de alimentación que une el bebedero con las cavidades del molde.

La sección ideal es la circular pero es difícil de mecanizar. Generalmente se utilizan secciones trapezoidales.



Diseño de canales múltiples

Entre los moldes podemos distinguir moldes de canales convencionales o fríos y los moldes de canales calientes. Nos centraremos en:

- Los moldes de canales calientes

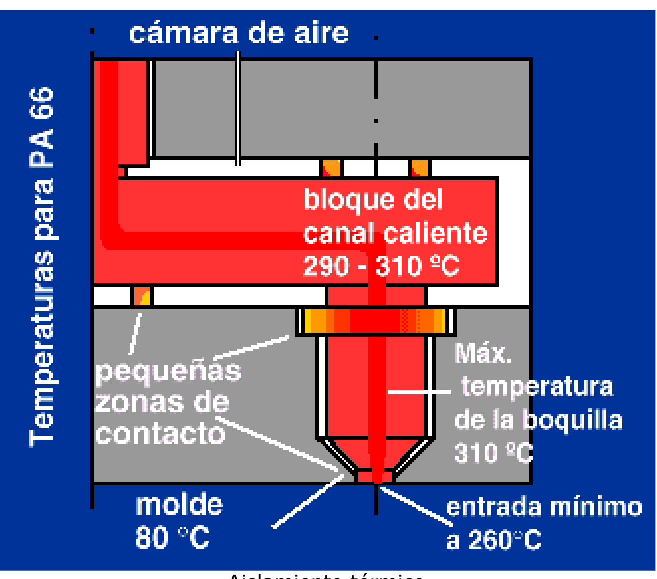
La conexión entre los canales y la cavidad del molde será a través de:

- Las Entradas



Los moldes de canales calientes

Los moldes de canales calientes o con cámara caliente constituyen una variedad frente a los moldes con sistema convencional de canales o de canales fríos. Se utilizan en moldes de muchas cavidades (por ejemplo, tapones de botellas) o en aquellos en los que los canales fríos convencionales resultarían demasiado largos, todo lo cual significa mayor cantidad de desperdicios, pérdidas de presión grandes y enfriamiento excesivo del material que pueden incluso hacer imposible el llenado de la cavidad. Los moldes de canal caliente se emplean para mantener el material fundido hasta la misma entrada de la cavidad.

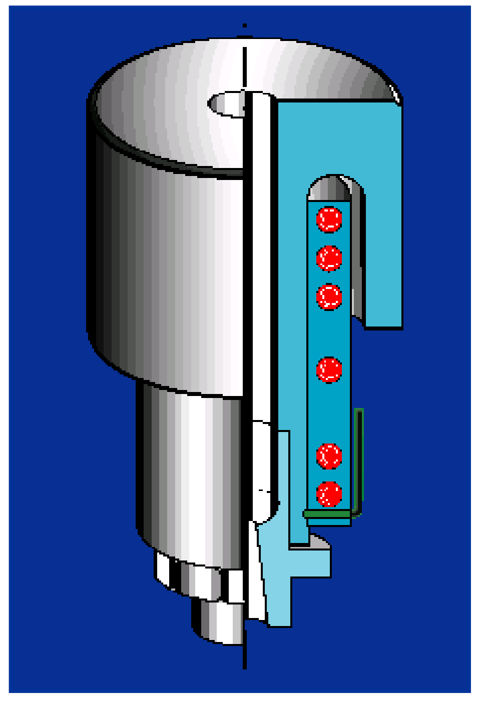


Aislamiento térmico

Dentro de los canales calientes el material permanece siempre fundido y por lo tanto no se produce desperdicio. En las piezas queda sólo una pequeña marca y el desmoldeo es totalmente automático. Estos moldes suponen un ahorro en cuanto a materia prima pero por otro lado son más caros y su manipulación es más complicada. También es posible la combinación de canales calientes y canales fríos.

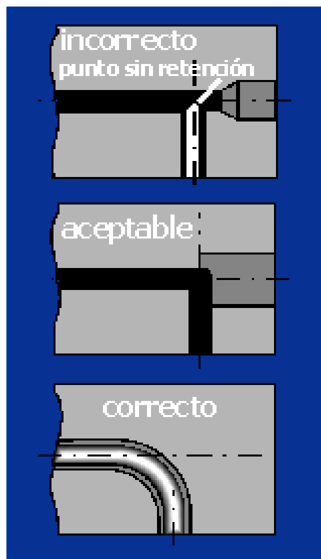


Existen varios tipos de cámaras calientes y diversos fabricantes (Mold Masters, Hasco, DME, etc.) pero básicamente todos ellos cuentan con la placa de distribución (manifold) y las boquillas (nozzle), cartuchos y resistencias de calefacción y termopares. Es necesario además, un sistema de control de temperaturas que bien puede estar incorporado dentro del control de la máquina (suele ser un extra) o puede ser externo lo cual favorece su portabilidad a otras máquinas. El conjunto de la cámara caliente debe ir aislado del resto del molde (generalmente con una plancha de mica) para que este se mantenga a la temperatura adecuada.





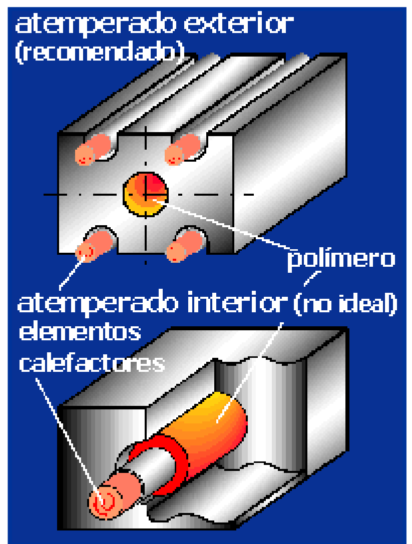
Diseño de boquilla recomendado



Cambio de sentido de flujo



Distribución de boquillas



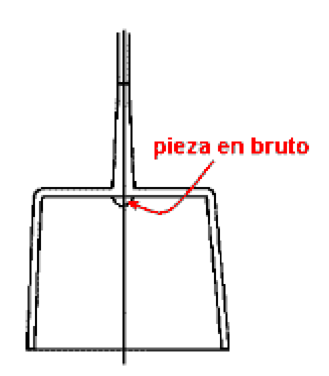
Sección transversal del paso de flujo en el interior del bloque



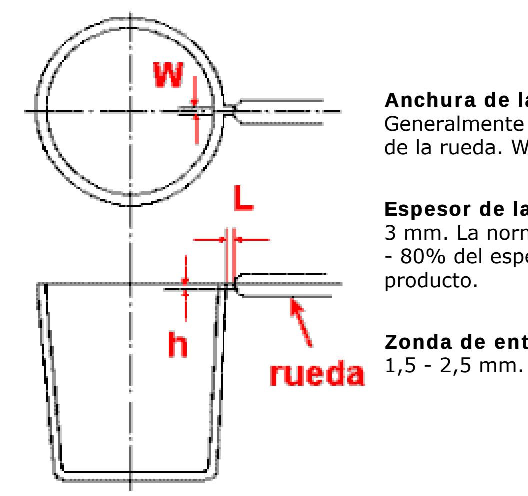
Las Entradas

Constituyen la conexión entre los canales y la cavidad. Existen diversos tipos:

- *Bebedero directo*. Se usan en moldes de una cavidad, en piezas como baldes, tapacubos, etc. El molde resulta simple. La entrada debe colocarse en el fondo de la pieza y donde no se vea. Hay que cortar la mazarota con unas tenazas y queda una marca muy visible. En piezas planas y poco profundas de polietileno, polipropileno y otras resinas se producen alabeos y torsiones debido a las tensiones residuales. Se pueden producir grietas alrededor de la entrada tras el moldeo, debido a la concentración de tensiones en esa zona. La caída de presión es baja.



- *Entrada lateral*. O estándar. Este tipo de entrada y las que describiremos a partir de ahora son de tipo restringido y producen pérdidas de presión grandes a la vez que producen un aumento de temperatura del material fundido debido a la fricción. La ventaja de la entrada lateral es que se puede controlar el llenado de la cavidad y el tiempo de solidificación de la entrada separadamente. La velocidad de llenado está relacionada con el área de la sección de la entrada y el tiempo de solidificación está relacionado con el espesor de la entrada. Es fácil de mecanizar, económica, fácilmente modificable y vale para prácticamente todos los materiales. Como inconveniente deja una marca en la superficie de la pieza.

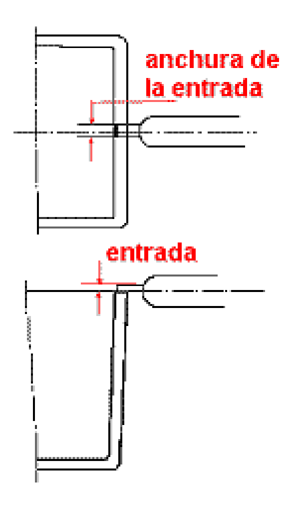


Anchura de la entrada (W): Generalmente dentro del diámetro de la rueda. W:h=3:1.

Espesor de la entrada (h): 0,5 - 3 mm. La norma general es del 70 - 80% del espesor de la pared del producto.

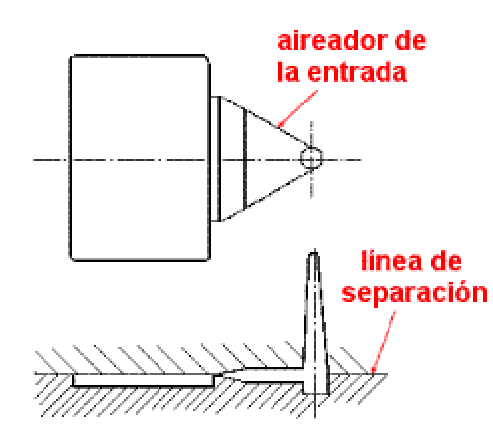
Zonda de entrada (L): 1,5 - 2,5 mm.

- *Entrada solapada*. Es una modificación de la anterior y se utiliza para atenuar la visibilidad de la marca que aquella produce.



- *Entrada en abanico*. Se utiliza para moldear artículos planos de superficie relativamente grande. El área de su sección permanece constante.

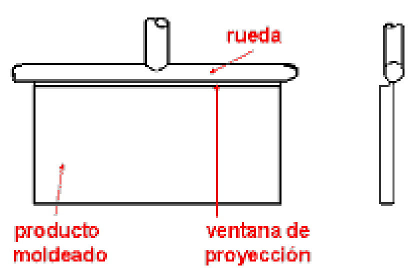






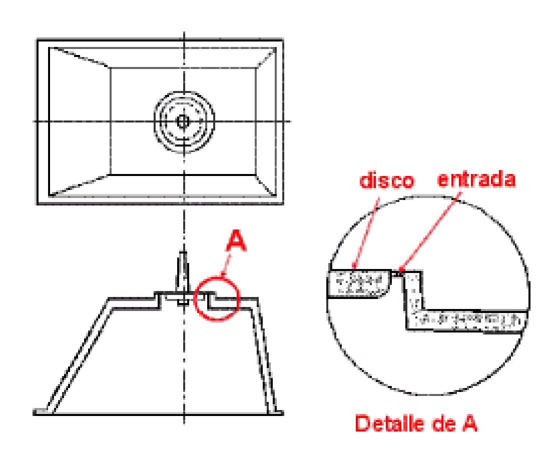
La anchura de la entrada es lo más grande posible, siempre que el área de la sección transversal de la entrada no supere el de la rueda.

► *Entrada de membrana*. O laminar. Se emplea en piezas planas de gran superficie. Sobre todo en material acrílico, en los que el alabeamiento y las tensiones residuales tienen que ser mínimos.

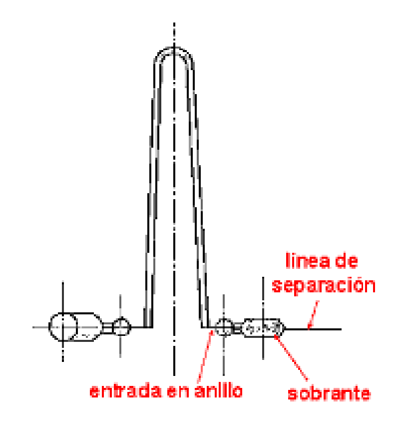


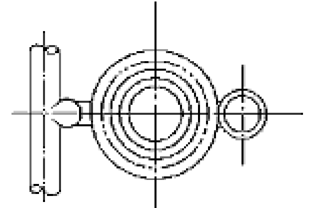
Zona de la entrada: 1 - 2 mm.
Espesor de la entrada: 0,2 - 1 mm.

► *Entrada de disco*. O diafragma . Se emplea en piezas con orificios de gran superficie, evitándose así la formación de líneas de soldadura.

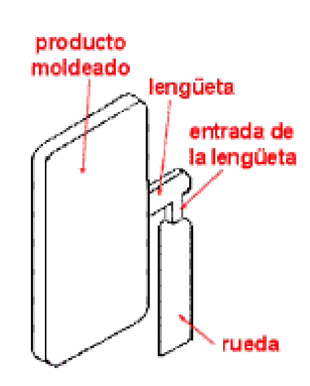


► *Entrada en anillo*. Se emplea para moldear piezas tubulares no muy grandes en moldes multicavidad. Con ella se evitan líneas de soldadura y la posibilidad de que el macho flexione.



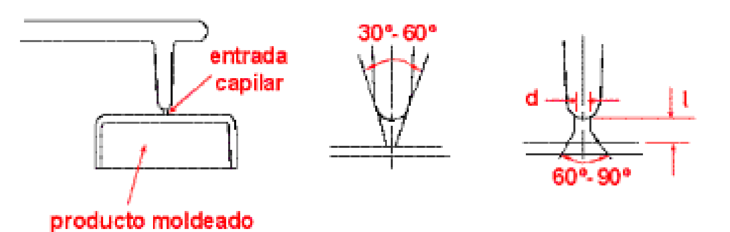


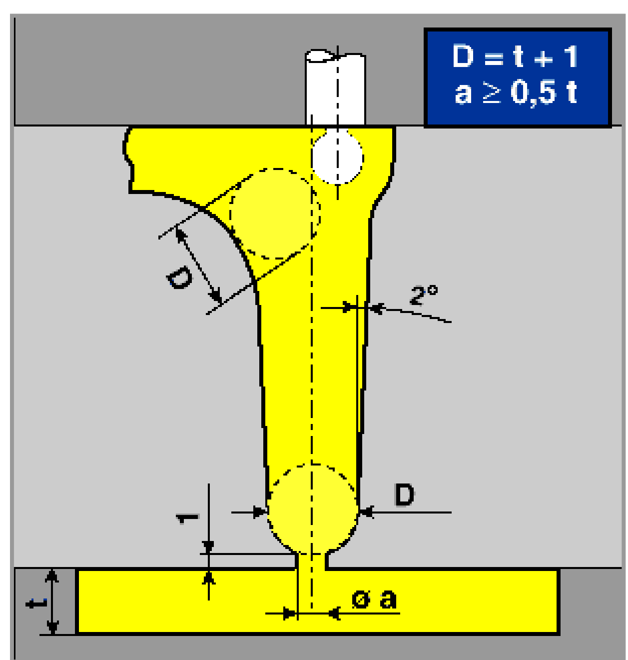




Entrada de lengüeta. Se emplea fundamentalmente en el moldeo de piezas de pared gruesa. Por ejemplo, en SAN, ABS, PC y acrílicos para prevenir el "chorro libre", disminuir tensiones internas e incrementar la transparencia.

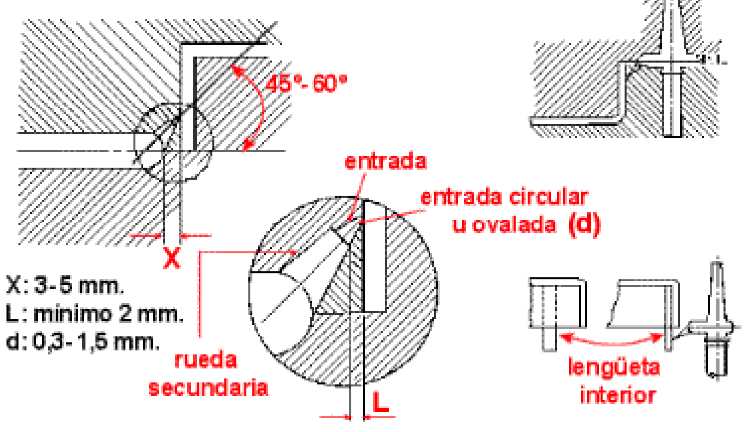
Entrada capilar. O pinpoint. está constituida por un conducto cónico de pequeño diámetro practicado en el molde.
Se utiliza principalmente en moldes de canales calientes y en los de tres placas que permiten expulsar separadamente las piezas de la colada (mazarota + canales).
También se utilizan en moldes de dos placas con boquillas especiales. Las marcas de las entradas apenas se notan.



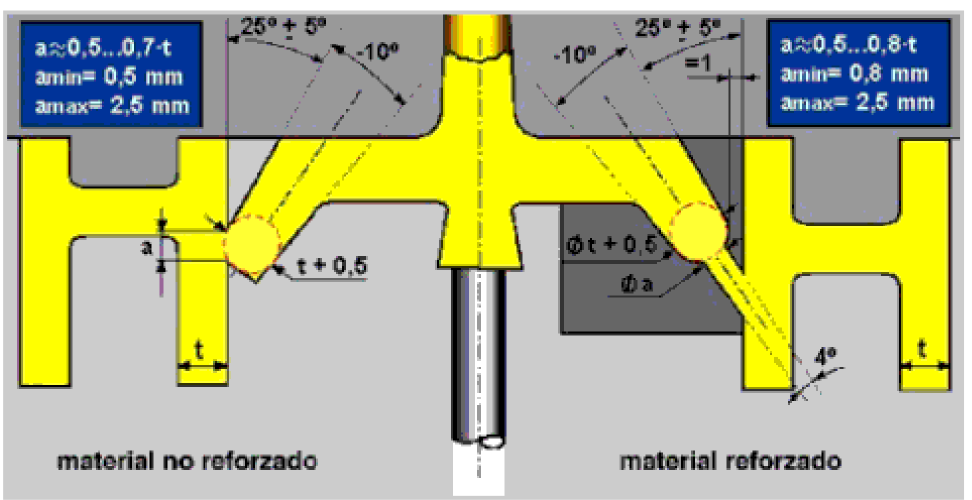


Punto de inyección capilar (molde de tres placas)

Entrada submarina. Se utiliza en moldes de 2 placas. La colada se separa (se corta) automáticamente de las piezas bien cuando el molde se abre o bien cuando se produce la expulsión.

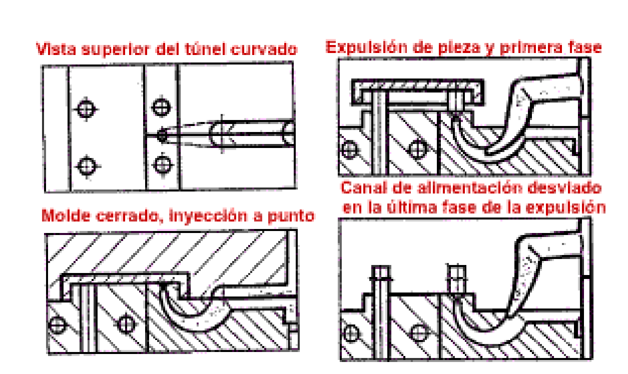






Puntos de inyección submarinos para polímeros de ingeniería

- *Entrada acodada*: Sus características principales son que permite la separación automática de los canales con respecto a las piezas y que el punto de inyección se encuentra en la parte inferior de la pieza que puede ser utilizada como cara no vista. Al igual que para la entrada submarina en el desmoldeo de las entradas acodadas es necesario que flexen, por lo que para materiales rígidos (termoplásticos amorfos y cristalinos con fibra de vidrio) la extracción puede ser dificultosa.





Respiraderos

Antes de comenzar el proceso de inyección y una vez cerrado el molde, las cavidades del mismo están llenas de aire. Al inyectar el material, parte del aire puede quedar atrapado en alguna zona de la cavidad, impidiendo que el material rellene la totalidad de la misma y obteniendo piezas con zonas de poca solidez y mala apariencia.

Por regla general, el material, inyectado a altas presiones, comprime el aire ocluido en los puntos más alejados de la entrada de la cavidad, sufriendo una compresión adiabática que da lugar a un aumento de la temperatura y que ocasiona señales de quemaduras sobre la superficie de la pieza moldeada.

Este inconveniente se manifiesta más ampliamente en cavidades profundas o de forma complicada, en moldes con insertos metálicos y en ciclos de producción muy rápidos.

Los respiraderos suelen ser unos pequeños surcos trazados en la superficies de unión de las placas del molde, o sobre las espigas extractoras, o bien pequeños orificios situados en aquellas zonas de la cavidad que lo requieran.

El escape de aire o gases desde el molde es fundamental. En ocasiones puede llegar a ser necesario el empleo de vacío.


Molde



8. REFRIGERACIÓN/CALEFACCIÓN DEL MOLDE

8.0 Introducción

El control de la temperatura del molde por calentamiento o enfriamiento de la cavidad del molde es un factor muy importante para el proceso de inyección, tanto a las exigencias técnicas como productivas. Para que determinada resina del plástico se forme debidamente, el molde puede ser necesario enfriarlo o calentarlo.

Como en la mayoría de los casos se enfría el molde, avanzaremos inicialmente con este término.

8.1 ¿Por qué se realiza la refrigeración en los moldes de inyección?

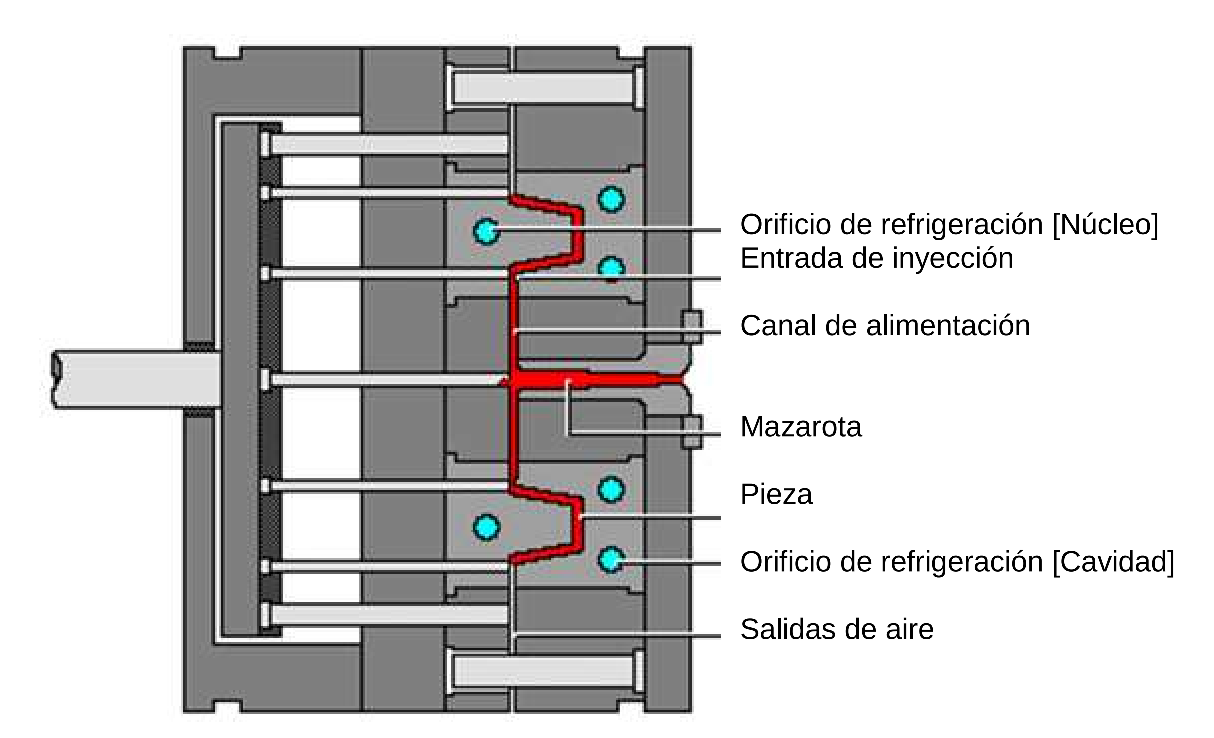
En general a los polímeros se le da su primera forma en estado fundido. Al efectuar el llenado, se inyecta la masa fundida a elevada presión y velocidad en el molde, cuya cavidad tiene la forma del artículo deseado. El material se adapta a la forma del molde, debiendo entonces **eliminar su calor** (hasta que la pieza adquiera suficiente rigidez) para que pueda ser des moldeada sin que sufra ninguna deformación por la acción de los componentes de expulsión.

El tiempo necesario hasta conseguir la temperatura de expulsión es lo que se llama **tiempo de enfriamiento**, y depende principalmente de los siguientes parámetros:

- Del espesor de la pieza
- Difusión térmica del material
- Conductividad térmica de los materiales del molde
- Sistema de control de temperatura del molde
- Ubicación de los canales de enfriamiento
- Eficiencia del flujo del refrigerante



Sección típica de un molde. Canales de enfriamiento [Orificios taladrados en el molde] se han perforado en la cavidad [fija] y en el núcleo [móvil] para la circulación del refrigerante.



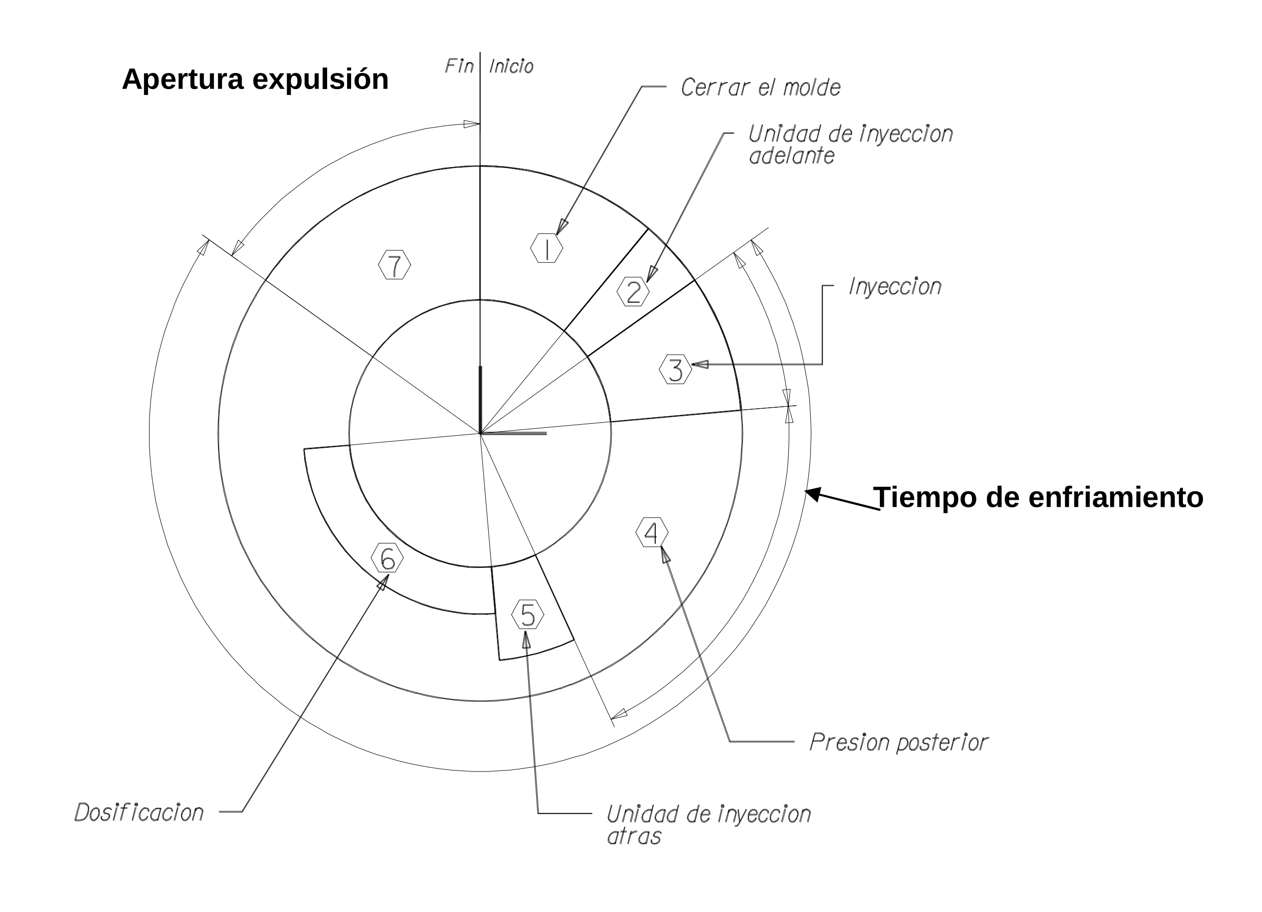
Teniendo en cuenta las diferentes fases que se compone un ciclo completo de inyección, el tiempo de enfriamiento es la fase de mayor duración, que muchas veces puede llegar a representar hasta el 80% del ciclo total. **Gráfico 1.** Por lo tanto es un factor económico de primer orden en la transformación de termoplásticos.

Factores que le afectan a la refrigeración del molde:

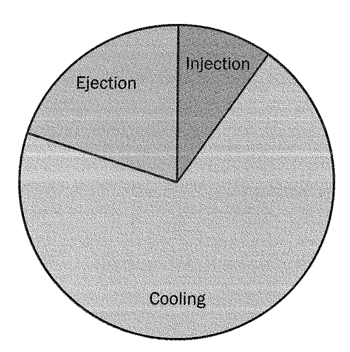
- Aumento de la temperatura del refrigerante desde la entrada a la salida
- Caudal del refrigerante de la entrada a la salida
- Composición química del refrigerante
- Conductividad térmica de los materiales del molde
- Sistema de inyección (frio/caliente)
- Canales de refrigeración tamaño, distribución de los componentes en contacto con los productos moldeados [insertos]
- Número de líneas de alimentación y retorno



Gráfico 1



Fases del proceso se ha esquematizado en el siguiente gráfico.



8.2 Balance de temperaturas en el molde.

El molde de inyección es una máquina de transferencia de calor grande y complejo. El plástico fundido es inyectado en la cavidad del molde a altísimas presiones y a la temperatura de fundido del plástico. Una vez que la cavidad está totalmente llena y empacada, la temperatura debe ser reducida de tal manera que la pieza sea lo suficientemente rígida para conservar la forma de la cavidad.
El enfriamiento comienza en la fase de llenado, aunque la mayor parte del calor extraído se produce a partir de esta fase.

Los plásticos se inyectan a diferentes temperaturas dependiendo a la familia a que pertenezcan.

Temperatura del material y moldes para varios polímeros

Material	T. Inyección (ºC)	T.Molde (ºC)
Polietileno(PE)	170-320	0-70
Poliestireno(PS)	200-250	0-60
Poliamida(Nylon)	240-320	40-120
Policarbonato(PC)	280-310	85-140
Poliacetal(Delrin)	180-320	70-130
Polipropileno(PP)	180-280	0-80
ABS	180-240	50-120

En general las temperaturas elevadas producen:

- buenas superficies (brillo)
- buena fluidez
- reducido grado de orientación y pocas tensiones propias;
- en consecuencia, pocas grietas de tensión;
- poca contracción posterior,
- pero largos tiempos de enfriamiento.

Moldes a baja temperatura producen:

- Piezas sin brillo.
- Piezas quebradizas.
- Ciclos cortos.

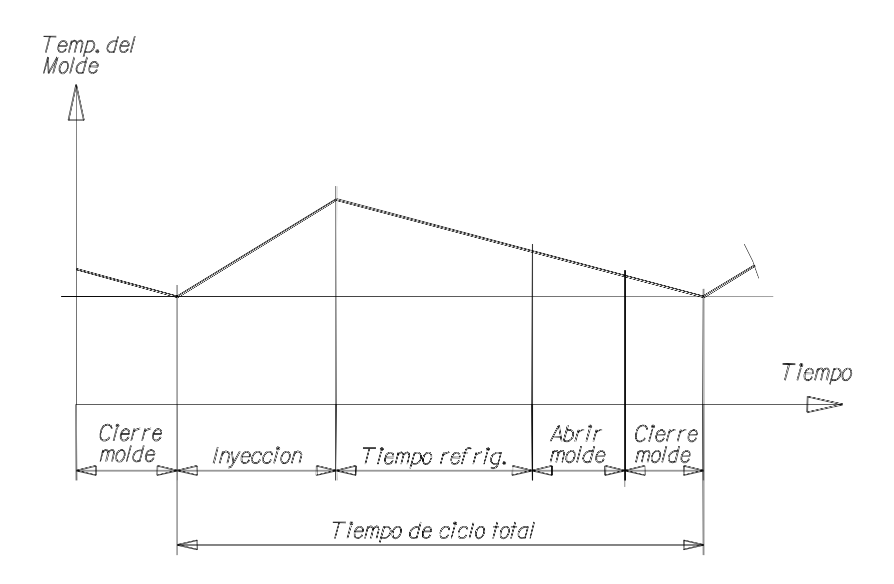
La temperatura del molde varía durante a lo largo del ciclo de inyección, según **Figura 8.2**

El sistema de enfriamiento influye en la variación de la temperatura.
La temperatura desciende más rápidamente después del des-moldeo (molde abierto).



La fluctuación es menor en el interior del molde.

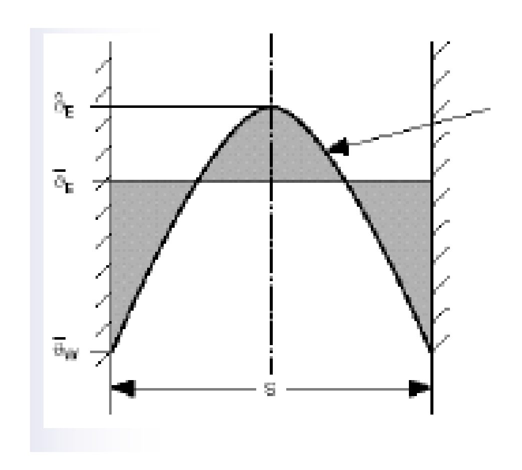
Figura 8.2



La calidad de la pieza moldeada dependerá en gran medida de mantener constante el perfil de temperatura del molde ciclo tras ciclo, ya que un cambio efectivo de temperatura afecta a la producción y calidad de las piezas en:

- Estabilidad dimensional,
- Tensiones internas
- Contracción uniformes
- Calidad superficial
- Alcanzar las características mecánicas adecuadas en todas las partes de la pieza.
- Reducir los costes de las piezas

Perfil de temperatura en las paredes de la pieza-





Temperatura de la balanza de plástico/calor.

Para convertir el plástico granulado "frío", en un líquido viscoso a la temperatura de inyección se necesita aportar al material una cantidad de energía.

La energía es suministrada principalmente por el trabajo del tornillo (máquina de inyección), que transforma la energía mecánica en calor, y con algo de calor añadido por las resistencias que rodean el barril de extrusión.

El calor suministrado al plástico durante la plastificación se debe quitar el interior del molde. Esto se logra mediante el enfriamiento del molde durante el tiempo de ciclo.
Tenga en cuenta que el calor se extrae del molde durante el tiempo total del ciclo, no sólo durante el tiempo de enfriamiento.

Durante el ciclo de inyección, es importante que la cantidad de calor que entra en el molde sea igual a la que sale.

Tenga en cuenta que el calor no sólo es removido por el refrigerante, sino que cierta cantidad de calor se irradia directamente desde la superficie del molde al ambiente de la planta. Además, una cierta cantidad pequeña de calor se irradia directamente desde la superficie del molde en la planta.

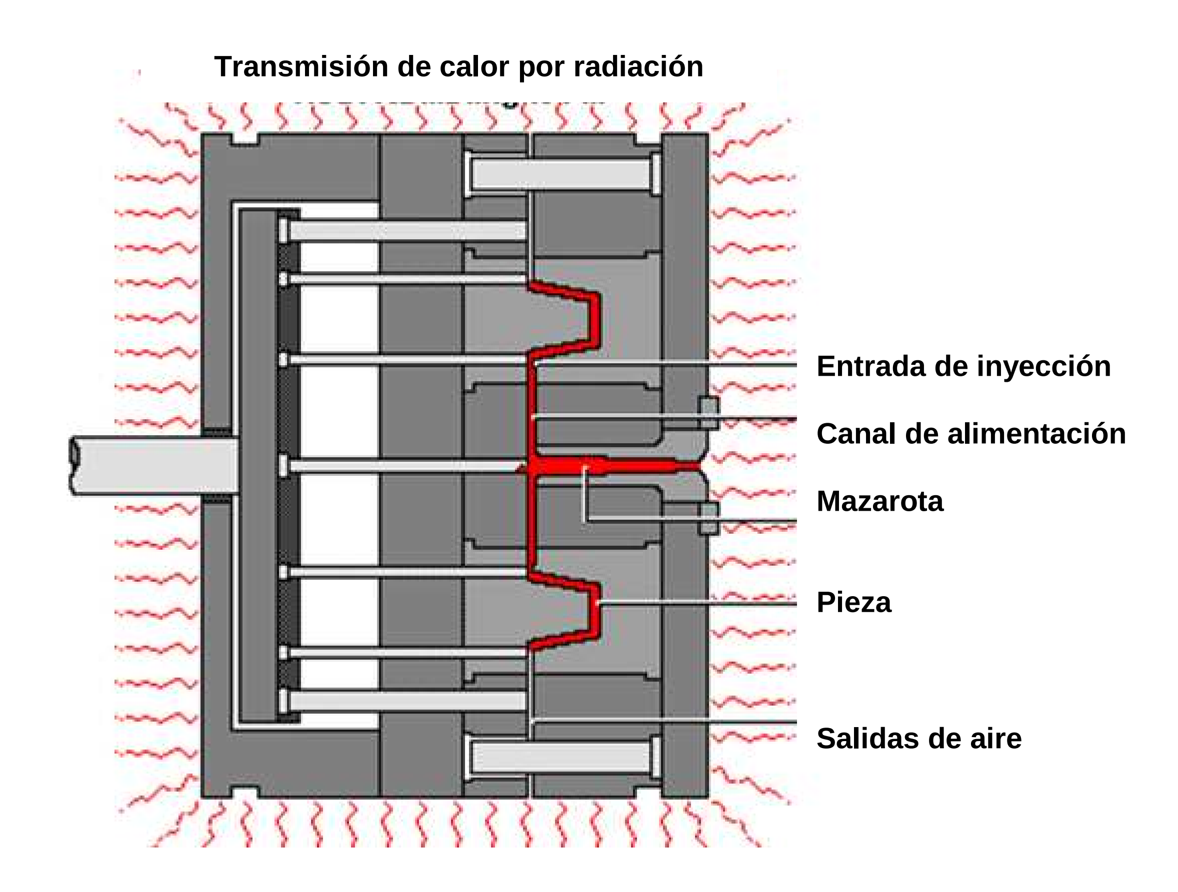
En ciclos cortos no hay tiempo para la eliminación del calor y el molde gradualmente se irá calentando, dando lugar a piezas inservibles, y por contar en ciclos largos paulatinamente se va enfriándose el molde, siendo necesario bajar el tiempo de refrigeración.



8.2.1 Control de temperatura del molde

El calor es un tipo de energía, por lo tanto sigue las leyes básicas de la física.
La primera ley es que sólo podemos transferir el calor, el frío no se puede ser transferido. El calor puede ser transferido por radiación, convección y conducción.
En un molde, la radiación y la convección son muy pequeñas, por lo que normalmente son ignoradas.
La conducción es el método principal y se lleva a cabo por el plástico que está en contacto con la superficie del molde.
El calor fluye de un cuerpo con una temperatura mayor a un cuerpo con temperatura menor. La diferencia entre los cuerpos afecta la velocidad de transferencia de calor más que la cantidad de calor contenido.

Radiación: Parte del calor se perderá por conducción a los platos de la máquina y parte se irradia en el aire que rodea a la base del molde.





Convección: Es la capacidad de un medio de transportar el calor de un lugar a otro.

$$H = q.A.\Delta T$$

q= constante de transmisión de calor por convección al aire [$8W/m^2$.grado]
A= Área de la superficie. Superficie lateral del molde
ΔT= Tem-Tambiente
Tem= Temperatura exterior del molde
Tambiente= Temperatura ambiente
La temperatura exterior del molde es difícil de estimar

Pérdidas con el molde abierto

Principios básicos de flujo de calor en el molde

1. Para transferir todo el calor del molde se utiliza el método de conducción
2. En el molde la radiación y la transferencia de calor por convección son insignificantes
3. El calor fluye de las áreas de mayor temperatura a las áreas de menor temperatura. Por lo tanto solo el calor puede ser transferido
4. La diferencia en temperatura controla el caudal de flujo y no el contenido de calor. Por lo tanto a mayor diferencia en temperatura mayor el flujo de calor.
5. El calor se transmite de la pieza de plástico a las paredes adyacentes y a través del material del molde a los canales de refrigeración y por último al líquido refrigerante.
6. Para asegurar la transferencia de calor apropiada, es necesario suministrar el flujo adecuado de refrigerante

En la **Figura 8.2** se aprecia cómo se efectúa la circulación de calor en un molde de inyección.



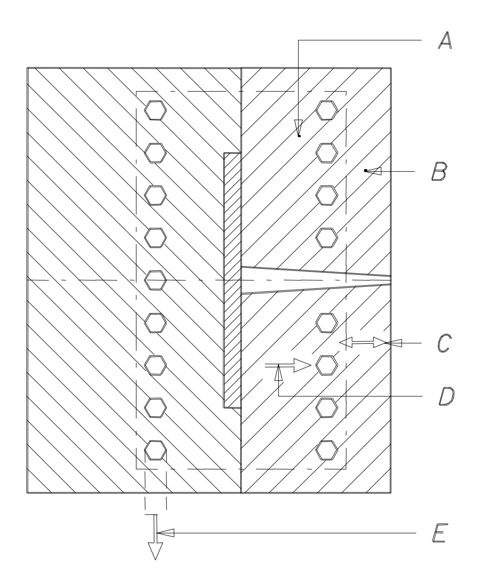


Figura 8.2

A. Zona refrigerada
B. Zona refrigerada/calentada
C. Cambio de calor con el medio ambiente [convección, radiación]
D. Cambio de calor con el componente (pieza inyectada)
E. Cambio de calor a través del refrigerante

Con temperaturas elevadas del molde la cantidad de calor disipado hacia el ambiente puede ser superior a la aportada por la masa inyectada. En este caso, el fluido que sirve de agente moderador tiene que aportar calor, a fin de garantizar, en la pared del molde, la temperatura; entonces no hay refrigeración, sino calefacción. Por ello, en sentido estricto, no son correctas las denominaciones de canales de enfriamiento sino que son más apropiadas denominarles canales de acondicionamiento o de atemperado del molde.

Otro factor importante a mencionar, en cuanto es un factor que depende de la temperatura del molde y repercute negativamente en la calidad superficial de las piezas es la formación de agua por condensación en las paredes del molde cuando se procesa con temperaturas muy bajas y permanece el molde abierto durante largo tiempo. Será preciso establecer un compromiso razonable en cada caso, y si los requisitos de calidad lo aconsejan habrá que controlar la humedad en las instalaciones de la planta de transformación.

Para los posteriores estudios a realizar sobre el cálculo de tiempos de refrigeración, consideraremos que la temperatura del molde durante el ciclo es constante.



8.3 Intercambio de calor

<u>Curvas de entalpía.</u>

En la práctica, pueden utilizarse diferentes métodos analíticos para estimar la cantidad de calor, a eliminar del material, en una tirada completa de inyección por el sistema de refrigeración.

Nosotros utilizaremos un método gráfico utilizando para ello las curvas de entalpía **Figura 8.3.**

Estas curvas nos indican la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de un kilogramo de material desde la temperatura de 20ºC, hasta el rango de temperatura determinado por el proceso.

Por ejemplo; vamos a suponer el siguiente proceso:

- Material a inyectar: **Polipropileno**
- Peso de la tirada de inyección: **100 gramos**
- Temperatura del material: **240ºC**
- Temperatura de expulsión (temperatura de desmoldeo): **40ºC**

Según la curva de la **Figura 8.3** correspondiente al **Polipropileno:**

- Entalpía correspondiente a 240ºC: **615kJ/kg**
- Entalpía correspondiente a 40ºC: **35kJ/kg**

La diferencia es **580kJ/kg**, y por lo tanto la cantidad de calor por tirada es **100/1000∗580kJ = 58kJ**.



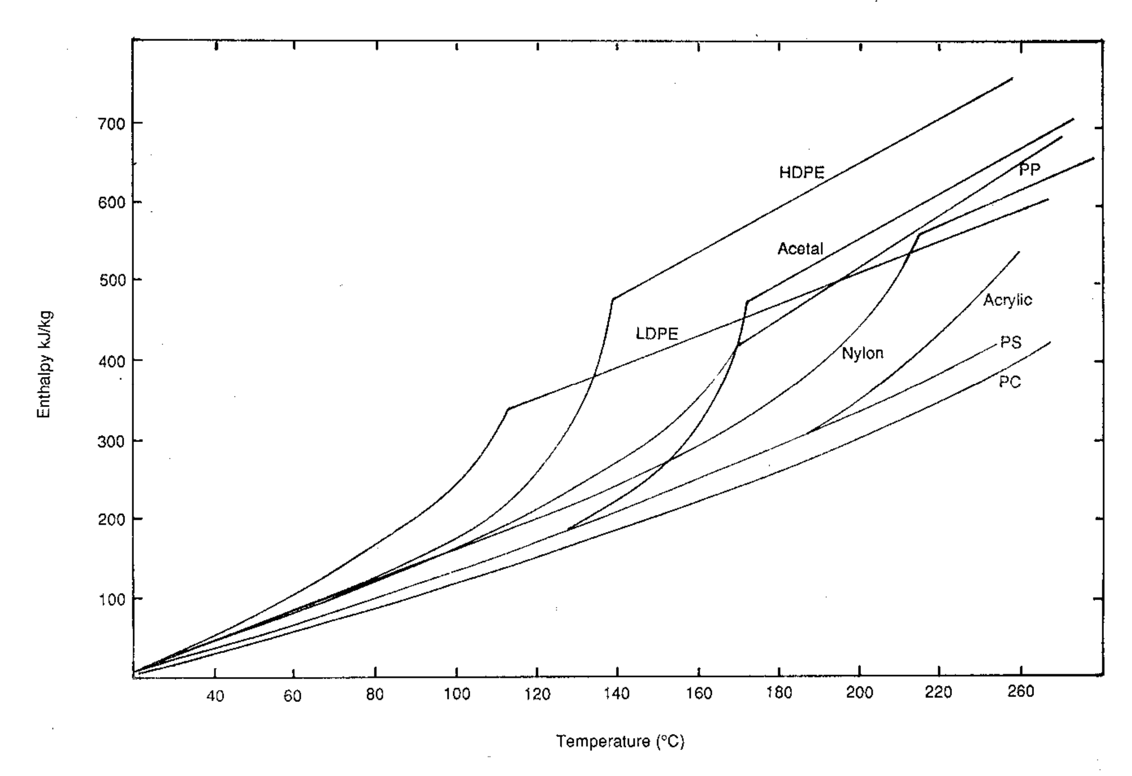


Figura 8.3. Curvas de entalpía de los polímeros comunes

La cantidad de calor a eliminar es considerable y la baja conductividad calorífica de los polímeros hace que por razones económicas, se debe realizar un sistema de refrigeración al molde para que el ciclo de inyección no sea demasiado alto.

La ***Tabla 2.3*** muestra la lista de las propiedades térmicas de los materiales polímeros y no polímeros.

Si comparamos con los metales los polímeros tienen un alto valor en la propiedad de calor específico y peor capacidad de conductividad calorífica.

Es común incorporar fibras de cristal y diferentes cargas dentro de los termoplásticos para incrementar su resistencia, rigidez y darle estabilidad dimensional. La consecuencia de esto, es que tales componentes plásticos poseen más bajo el calor específico que sus parientes los polímeros. Consecuentemente, requieren menores requisitos para la extracción de calor.

Se aprecia que la **fibra de vidrio** y **talcos** tienen mejores propiedades en cuanto a la conductividad de calor que los polímeros.



Esta claro que un fuerte enfriamiento del molde nos hace rebajar el tiempo de enfriamiento y consecuentemente el ciclo de moldeo. Pero un rápido enfriamiento puede presentar problemas en estabilidad dimensional y origen de distorsiones internas en las piezas.

8.5 Refrigeración del molde

La pieza transfiere calor al molde, entonces lo que necesitamos es eliminarlo realizando canales llamados de refrigeración, donde circulara a través de ellos liquido refrigerante, que en mucho de los casos será sencillamente agua.

Si la cantidad de calor a eliminar por tirada y el tiempo de refrigeración son conocidos, la velocidad de eliminación del calor, para mantener la temperatura establecida depende de la velocidad que circula él líquido refrigerante por los canales de refrigeración. Para ello, es necesario especificar la variación de temperatura del líquido refrigerante entre la entrada y salida del molde. Es usual especificar una tolerancia de ±2ºC, esto quiere decir que puede haber una diferencia de temperatura del líquido refrigerante entre la entrada y salida del circuito de 4ºC.

Considerando una pieza de **poliestireno** y la condición primera descrita en la ***Tabla 9***.

El tiempo de enfriamiento calculado es **8,5** segundos. Suponemos que la pieza es un cuadrado de 100mm.

El volumen de la pieza será:

$$(10 \times 10^{-2})^2 \times (2 \times 10^{-3})\ m^3 = 2 \times 10^{-5}\ m^3$$

El peso de la pieza:

$$(2 \times 10^{-5}) \times (1.06 \times 10^3)\ kg = 0.0212\ kg$$

Utilizando las curvas de entalpía especificadas anteriormente vemos en la ***Figura 8.3,*** que la cantidad de calor a eliminar en el tiempo de enfriamiento es de **220º C** a **60º C** es:

$$370 - 60 = 310\ kJ/kg.$$

La cantidad de calor a eliminar por pieza es por lo tanto:

$$310 \times 0.0212 = 6.6\ kJ = 0{,}773 kJ/s$$

La cantidad de agua necesaria para eliminar el calor y la velocidad se calcula, utilizando la tolerancia de **más menos 2º C** para el agua, entre le entrada y



salida, y sabiendo que el **calor específico del agua es 4.18 J/g (4.18 kJ/kg)**, tenemos que:

0.773 = 4.18 x Volumen de agua x 4

La cantidad de agua por segundo es por lo tanto:

0.047 Kg/s = 4.7 x 10^{-5} m^3/s; Aproximadamente 0.05 l/s o 3 l/min.

Con este dato podremos calcular seguidamente las dimensiones necesarias para los canales de refrigeración.

8.6 Flujo de fluidos.

8.6.1 Introducción

Hay dos tipos de flujo significantes a considerar en el diseño de moldes. Una es la de la mezcla polimérica que recorre los canales para el llenado de la cavidad, y la otra la que nos interesa en este momento es la del líquido refrigerante que recorre los canales de refrigeración.

8.6.2 Sistema de enfriamiento

El medio refrigerante utilizado comúnmente es agua pero se pueden utilizar otros líquidos u otros sistemas según la temperatura deseada en el molde.

Por medio de una bomba es enviado el refrigerante del depósito al molde a través de una manguera flexible, pasa a través de los canales realizados en el molde, antes de retornar a la unidad de bomba o al depósito vía otra manguera.

La velocidad de eliminación del calor de la pieza depende, como se ha mencionado anteriormente de la velocidad del líquido refrigerante a través de los canales de refrigeración practicados en el molde. Los canales de refrigeración en la mayoría de los casos son agujeros taladrados en el molde por lo tanto tienen sección circular.

Siendo así, la velocidad del refrigerante depende de las dimensiones de los canales de refrigeración: de la longitud (**L**) del radio (**r**), de la viscosidad (η) y de presión (**P**). Estos factores son relacionados por la ecuación de Poiseuille¨s para flujo a través de canales circulares:

$$Q = \frac{P \pi r^4}{8 \eta L} \qquad (8.6)$$

Con las unidades en metros, kilogramos y en segundos.

El cálculo de esta ecuación nos asegura si las dimensiones de los canales de refrigeración son proporcionales a la bomba utilizada o por el contrario si la bomba es adecuada para el circuito realizado.



8.6.3 Calculo sencillo

Vamos a suponer el caso anterior, en el cual el refrigerante circula a 3l/min.

Cual es la máxima longitud de canal que podemos introducir en el circuito de refrigeración usando una presión de 10 psi (70.000 Pa) si el canal tiene un diámetro de 6mm, que es un diámetro típico; recordando la ***ecuación8.6*** tenemos:

$$\mathbf{L = \frac{P\,\pi\,r^4}{8\,\eta\,Q}}$$

Sustituyendo (recordando que la viscosidad del agua es 0.001 Pa s; 3l/min = 0.00005m^3/s; diámetro de 6mm = radio 3mm = 3 $*10^{-3}$ m.

$$\mathbf{L = \frac{70.000 \times \pi \times (3 \times 10^{-3})^4}{8 \times 0{,}001 \times 5 \times 10^{-5}} = 44m}$$

Que es más que suficiente para éste molde.

Alternativamente vamos a suponer que la bomba esta trabajando a 20 psi (140.000 Pa) cual es el diámetro menor del canal si entregamos 3l/min y tenemos una longitud de circuito de 10m. Recordando otra vez la ***ecuación 8.6***

$$\mathbf{r^4} = \mathbf{\frac{8\eta QL}{\pi P}}$$

Y sustituyendo los datos

$$\mathbf{r^4} = \frac{8 * 0.001 \times 5 \times 10^{-5} \times 10}{\pi \times 140.000} = 9.09 * 10^{-12}$$

De donde el radio sale que es de 1.7 x 10^{-3}m = 1.7mm y el diámetro es de 3,4mm

La ecuación de Poiseuille;s es un simple y efectivo camino para calcular los parámetros de los canales: Diámetro, longitud del canal, la caída de presión y la velocidad de circulación pueden ser calculados si conocemos la viscosidad del fluido.

Es común utilizar mangueras de un diámetro superior a los canales de refrigeración, lo que produce una pequeña caída de presión así de este modo fabricamos mas presión disponible para dar velocidad a través de los canales



del molde. Esto significa que podemos utilizar mayores longitudes de circuito si fuese necesario.

El cálculo de las dimensiones de los canales de refrigeración, lo que no resuelve es la información sobre la posición de los canales en el molde.

8.6.4 Viscosidad

Tenemos que recordar que el valor de la viscosidad de 0.001 Pa s utilizado en los cálculos anteriores es correcto para el agua a 20ºC.

La viscosidad decrece exponencialmente cuando aumenta la temperatura, la **Figura 8.6.4** muestra la variación de la viscosidad con la temperatura en el caso del agua. La ecuación general para la variación de la viscosidad en función de la temperatura es:

$$\eta = A \exp (E/RT)$$

Donde **E** es una constante característica del liquido, **R** = 8.314 J/mole, y **T** es la temperatura en términos absolutos (**K**).

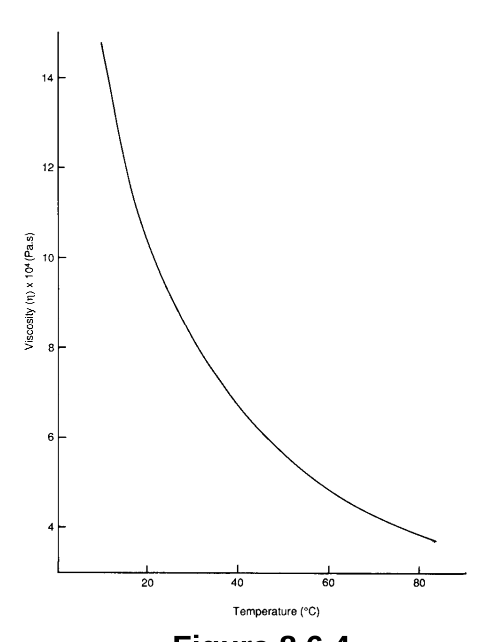


Figura 8.6.4

Si el medio refrigerante es otro líquido por ejemplo el aceite tenemos que utilizar para los cálculos los datos de viscosidad adecuados.



8.6.5 Limitaciones de la ecuación de POISEUILLE,S

***8*.6.5.1 Flujo turbulento**

La ecuación de Poiseulle,s solo asume flujos laminares del tipo que se muestra en la **Figura 8.6.5.1**. Las capas cercanas a las paredes del canal se mueven lentamente debido al rozamiento con las paredes, y las capas centrales se mueven a gran velocidad. El líquido fluye a una velocidad parabólica según la **Figura 8.6.5.1**.

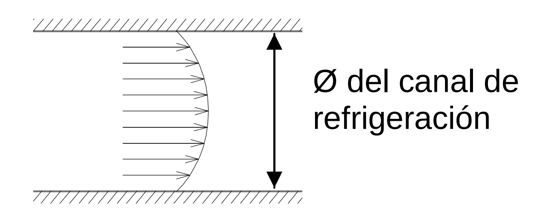
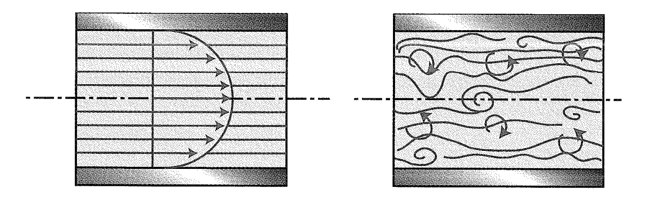


Figura 8.6.5.1

Si la velocidad lineal excede de un cierto valor el flujo se vuelve turbulento.



La ecuación de Reynolds, sirve para el cálculo de la velocidad critica (**v**) para el paso a flujo turbulento en tubo de radio (**r**), la densidad del líquido (**ρ**) y de viscosidad (**η**) y la constante conocida de Reynolds(R) que debemos coger de 2000

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{R}\,\eta}{\rho\,\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{2000}\,\eta}{\rho\,\mathbf{r}}$$

Sustituyendo los datos para el agua a 23º C y el recorrido a través de canales de 6mm nos da como resultado que el flujo es turbulento. En realidad, el agua que recorre el circuito de refrigeración en un molde es generalmente turbulenta y aunque la ecuación de Poiseuille¨s no es estrictamente aplicable, hay que tomar en consideración su aplicación.

El flujo turbulento es más eficiente que el laminar y por lo tanto es más deseable. La alta viscosidad de los aceites utilizados como medios refrigerantes significa que no exceden de la velocidad crítica y generalmente el flujo es de tipo laminar.

8.6.5.2 Sección de los canales

La ecuación de Poiseuille´s es aplicable solamente a canales de sección circular.



8.7 Diseño de sistemas

8.7.1 Introducción. Requerimientos para la refrigeración

Las condiciones de transformación y las propiedades térmicas de los polímeros difieren marcadamente unos con respecto a otros **(*Tabla 2.3*)**, y especialmente en el valor del calor específico.

Por ejemplo el polipropileno tiene un valor de calor específico superior al poliestireno por lo que será necesario un incremento de flujo del líquido refrigerante a través del sistema de refrigeración.

"Una vez realizado los cálculos y seleccionado el refrigerante, la efectividad de la refrigeración sobre el componente, será el resultado de colocar adecuadamente los canales de refrigeración"

El diseñador, tiene que conseguir una estabilidad térmica entre el componente y el molde dado que las diferencias se verán reflejadas en la calidad de la pieza.

Como regla general el efecto del sistema de refrigeración debe ser especial donde la parte del componente ***esta más caliente*** y progresivamente ir disminuyendo su efecto donde ***está más frío***.

La **Figura 8.7*.*** Muestra el perfil térmico de un típico componente de sección circular y punto de inyección situada en su centro.

Con respecto a la figura el punto más caliente se encontrará en el centro próximo a la entrada y las más frías estarán en los extremos del componente.

Tomando en consideración la regla general, para obtener la pieza con un mínimo de alabeo y tensión tenemos que conseguir eliminar un máximo de calor en el centro, punto caliente, e ir decreciendo su efecto hacia los extremos.

Para conseguir éste balance térmico incorporamos al molde un sistema de refrigeración de canal en espiral.



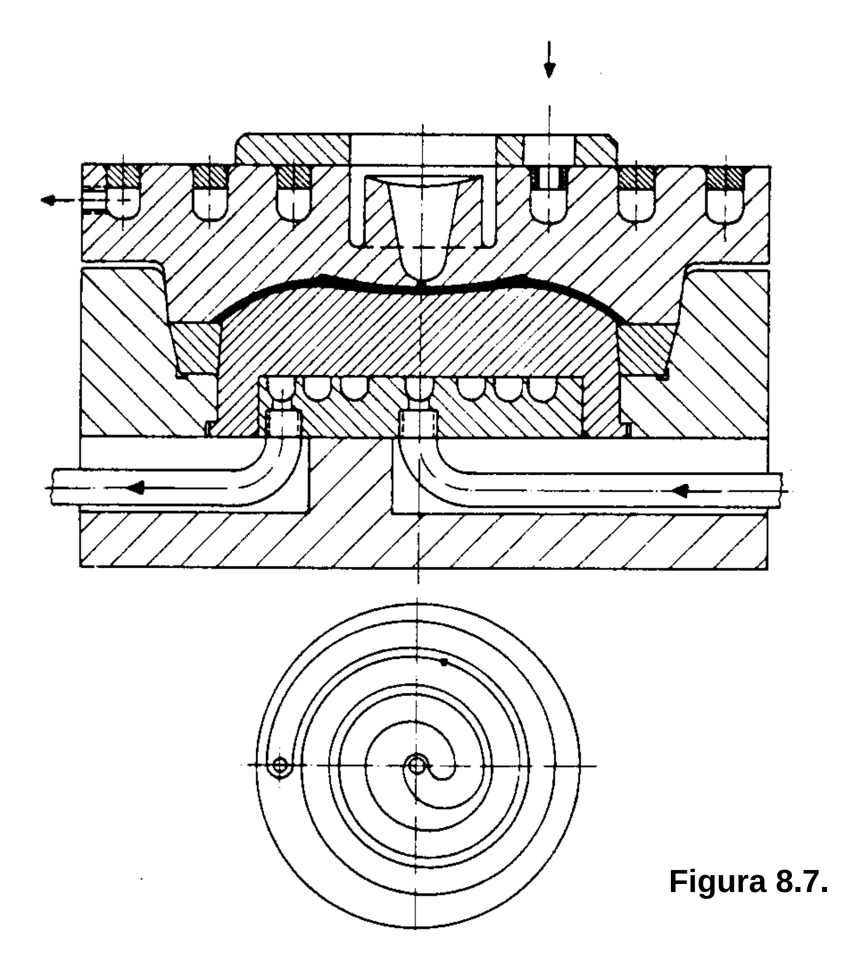


Figura 8.7.

El líquido refrigerante actúa primeramente sobre el punto situado frente a la entrada de material, consiguiéndose así que la diferencia de temperatura entre la pieza y el líquido sea máxima en el punto más caliente, por lo que puede disiparse mayor cantidad de calor. En su recorrido por la espiral, el líquido adquiere temperatura, de modo que, en los puntos donde la masa está más fría por ser más largo el camino de flujo, el gradiente de temperatura es menor y también el calor disipado. Adicionalmente el perfil de sistema de refrigeración ayuda a conseguir el llenado de la cavidad, pues en las extremidades de la pieza moldeada, cuando la presión de la cavidad tiene el mínimo efecto, el efecto del refrigerante también es menor.

Debido a la complejidad de las piezas moldeadas es raro conseguir tan fácil la estabilidad térmica del componente.



Principalmente los puntos a tener en cuenta para realizar el diseño de un sistema de refrigeración son:

- La relevancia de la posición del punto de inyección.

- Las paredes gruesas de los componentes, los puntos de intersección de los nervios, las protuberancias con el encuentro de las secciones, deben de ser considerados como posibles localizaciones de puntos calientes.

- La posición del punto de expulsión (expulsores) está muchas veces en contradicción con el sistema de refrigeración que requiere el componente. Los componentes muchas veces tienen nervios que requieren una expulsión individual, por lo necesitamos esquivar el circuito de refrigeración dando como resultado una deficiente refrigeración en esa zona, que se refleja en un aumento del ciclo de inyección y en la mala calidad del componente. La inclusión de expulsores cilíndricos o tubulares reduce en muchos casos el espacio necesario de los canales de refrigeración, con el resultado en muchos de los casos de su omisión.

- La introducción de insertos en la cavidad y especialmente en los núcleos, da como resultado el cierre del sistema de refrigeración con el aumento de temperatura en estos puntos. Siendo a menudo imposible la introducción de sistemas convencionales de refrigeración en estas zonas. En posteriores apartados veremos las distintas opciones que tenemos en el mercado.

- Espacio disponible

- Coste

Y las siguientes consideraciones:

- Simplicidad de formas

- Simetría

- Número de circuitos requeridos para asegurar una refrigeración constante en todo el producto.



8.7.2 Estimación del tiempo de enfriamiento.

El tiempo de enfriamiento ya lo hemos estimado anteriormente.

Los cálculos realizados están abiertos a errores por los factores y gráficos que se utilizan, así como a las siguientes consideraciones:

a) Se considera total el contacto existente entre la superficie de la pieza, con la del molde durante toda la fase de enfriamiento. Cuando en la inyección de termoplásticos es raro que ocurra debido al efecto de la contracción del material.

b) La velocidad y la temperatura del refrigerante se consideran constantes a través de los orificios del molde, siendo en realidad variable durante el ciclo.

c) El componente moldeado es homogéneo a través de toda la sección. Un supuesto que no ocurre, debido a:

- El contacto con la superficie fría del molde.
- La orientación del polímero durante el llenado del molde.
- La adición y orientación de las cargas.
- La presencia de varios grados de cristalinidad en la pieza.
- La pérdida de calor del componente en los extremos.

Contenido calórico.

Para elevar la temperatura de cualquier material, hay que suministrarle una cierta cantidad de calor (energía). La cantidad de energía a suministrar para elevar la temperatura hasta la temperatura de moldeo es diferente para los distintos tipos de materiales.

Una vez inyectado se debe quitar para que el plástico se vuelva rígido para poder sacarlo del molde. La eliminación de calor se lleva a cabo a través de las paredes del molde al medio refrigerante, y también por radiación al medio ambiente y por convección con los platos de la máquina.

Debemos entender en un principio que la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura tiene que igual a la cantidad de calor a eliminar. Sin embargo, la mayoría de las veces, los productos se expulsan bastante caliente y, por tanto, todavía contienen algo del calor añadido durante plastificación. Este calor ahora se emitirá desde los productos al medio ambiente de la planta.

El diseñador también debe darse cuenta de que los plásticos amorfos, como el PS, el vinilo, ABS, el aumento de temperatura es proporcional al calor agregado, y el enfriamiento en proporción al calor cedido al refrigerante. Los materiales cristalinos, tales como PE, Nylon, PET, requieren una cierta cantidad de calor en un nivel de temperatura determinado sólo para fundir los cristales sin aumentar la temperatura del plástico. Sólo después de que los



cristales se han derretido el plástico, ahora amorfa seguirá aumentando su temperatura en proporción a la potencia térmica.

8.7.3 Medio refrigerante

La temperatura del molde es dictada según los requerimientos del polímero a procesar.

Para conseguir las temperaturas del molde en el rango de frío/calor los medios más utilizados son

Medio refrigerante	***Rango temperatura de trabajo***
Anticongelante	-20 a 0
Agua	0 a 90
Vapor	90 a 240
Calor/aceite	240 a 350
Electricidad	150 a 450

Utilizar el correcto medio refrigerante es esencial para conseguir la velocidad en la eliminación de calor a la pieza.
Aunque sea costoso mantener la temperatura del refrigerante por la necesidad de equipamientos individuales, no hay que menospreciar el control de su temperatura, porque nos asegura la calidad de las piezas y especialmente en las grandes producciones.
Temperatura del medio refrigerante

El medio de enfriamiento es generalmente agua, preferiblemente acondicionado para reducir al mínimo la contaminación del sistema de refrigeración como son los depósitos de cal o de otras sustancias presentes en el agua que pueden corroer los canales de enfriamiento. Esta contaminación se deposita en las paredes del circuito que reduce sensiblemente la transferencia de calor entre el molde y el medio refrigerante.

Cuando la temperatura del agua requerida es baja, o las líneas de suministro están expuestas a temperaturas muy bajas, se añade un anticongelante al medio. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el agua de refrigeración se mantiene igual o superior a 5Cº y no es necesario ningún tipo de anticongelante.

En la mayoría de las instalaciones de moldeo el refrigerante a los moldes se suministra desde un sistema central o por medio de enfriadores individuales a cada máquina de moldeo.



8.7.4 Propiedades de conductividad térmica de los materiales utilizados en la construcción de moldes.

En el proceso de selección de materiales para la construcción de moldes es fundamental tener en cuenta los valores de conductividad térmica, ya que esta propiedad tiene influencia directa en la refrigeración del componente.

Indicamos los valores de conductividad térmica de los materiales utilizados.

Material	Conductividad del térmica (W/mK)
Ni/Cr Aceros de moldes	**30-60**
Acero inoxidable(12-!8%Cr)	**18-13**
Aluminio	**197**
Berilio, cobre	**158**
Bronce	**94**

Un error común es utilizar materiales de baja conductividad térmica en polímeros que tienen alto calor específico

Conductividad Térmica

La conductividad térmica es una medida de la velocidad a la que un material conduce el calor (caliente/frio). Esta medida es diferente para distintos materiales, y las cifras reales se pueden encontrar en diferentes referencias. El diseñador del molde debe estar preocupado por la conductividad térmica de materiales plásticos y de los materiales del molde.

Los plásticos en general conducen muy mal el calor, y puede haber diferencias significativas entre los diversos plásticos. Sin embargo, en la mayoría de los casos podemos ignorar estas diferencias.

Es importante, darse cuenta de que la capa de plástico tocar las paredes de la cavidad tiene una conductividad muy baja en comparación con la conductividad del material del molde, se forma una capa aislante entre la masa del plástico y el acero del molde. Esto influye en la velocidad de enfriamiento en un grado mucho mayor que la temperatura del molde o el material de las cavidades.



8.7.5 Localización de los canales de refrigeración

Después de realizar los cálculos para hallar las dimensiones de los parámetros más importantes del circuito de refrigeración, la eficacia y su máximo efecto sobre la pieza, está en su localización, situación en el molde.

El efecto de los canales de refrigeración cilíndricos, utilizados normalmente, tiende a ser radial como lo muestra la **Figura 8.7.5a**

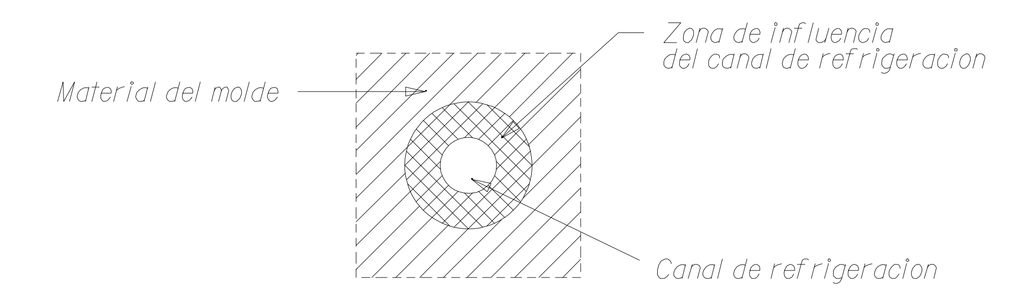


Figura 8.7.5a

Debido al efecto simétrico de los canales radiales, se aplica una simple fórmula para su colocación en el molde. ***Figura 8.7.5b.***

Fórmula para situar los canales: **x = 1,5D, y = 3D**

Para componentes de espesores: **T = 2mm, D = 8mm**
T = 3mm, D = 10mm
T = 4mm, D = 12mm

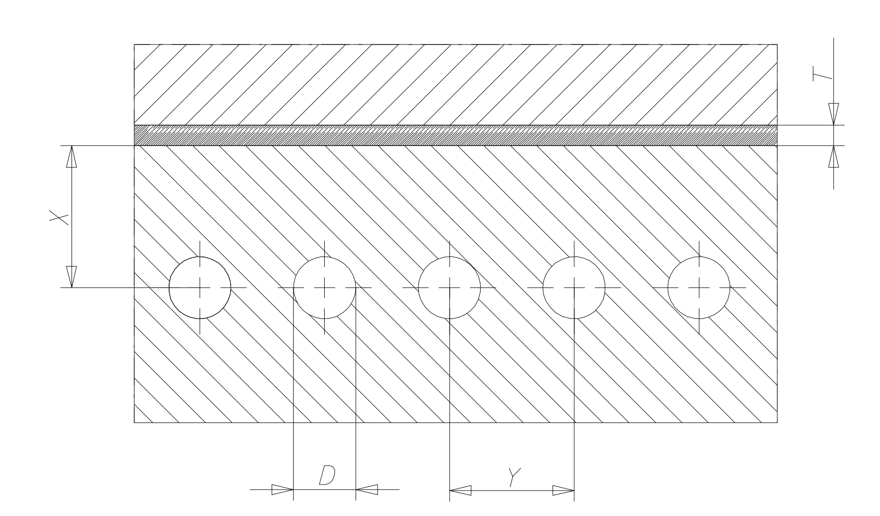
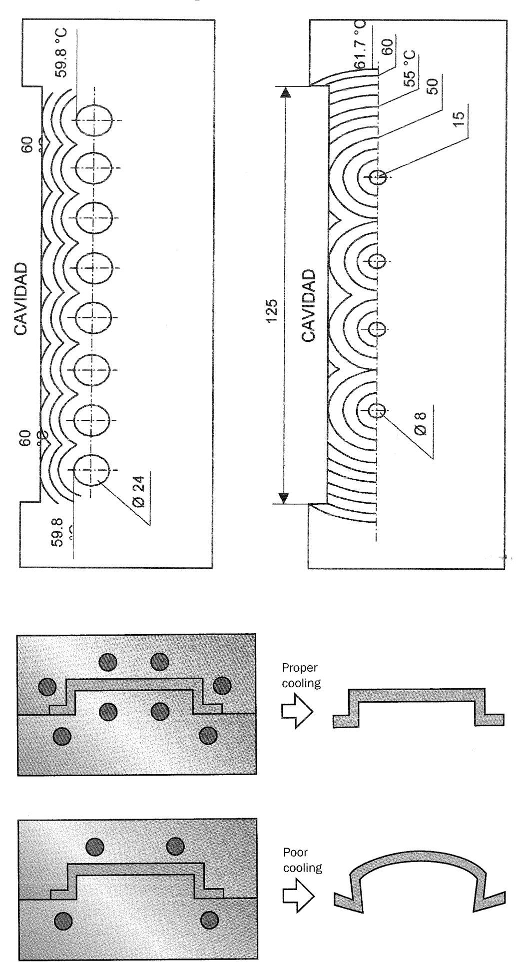


Figura 8.7.5b

Estas medidas son orientativas y pueden variar según necesidades del diseño.



Distribución del calor sobre la superficie del molde



La ubicación de los canales de enfriamiento es crítica y está determinada por el diámetro de la broca. Si realizamos un gran diámetro muy cerca de la cavidad, pueden suceder dos cosas. Primero que el material remanente puede ser muy delgado, y la presión del plástico puede originar deformaciones. Adicionalmente el efecto de enfriar muy rápido las áreas muy próximas al canal comparado, con las otras partes más alejadas, genera estrés en la pieza de plástico.

El método óptimo para determinar los requerimientos de enfriamiento, es el que se lleva a cabo con un programa de simulación.

Generalmente los canales de enfriamiento en el lado cavidad son los más fáciles de diseñar, ya que se trabaja en el exterior de la pieza. Esto nos brinda espacio extra y si es necesario se puede añadir material. Debido a la contracción del plástico, este se retira de las superficies exteriores por lo que la cavidad solo remueve del 25 al 40% del calor.
Por el contario, el núcleo está determinado por las medidas de la pieza. Además, el núcleo contiene el sistema de expulsión, esto complica la instalación de los canales y normalmente es más difícil de diseñar un sistema de enfriamiento eficiente.



8.7.6 Refrigeración de elementos planos

En piezas planas de sección uniforme se emplean dos sistemas diferentes de refrigeración, sistema conectado en serie **Figura 8.7.6a** y el sistema conectado en paralelo **Figura 8.7.6b.**

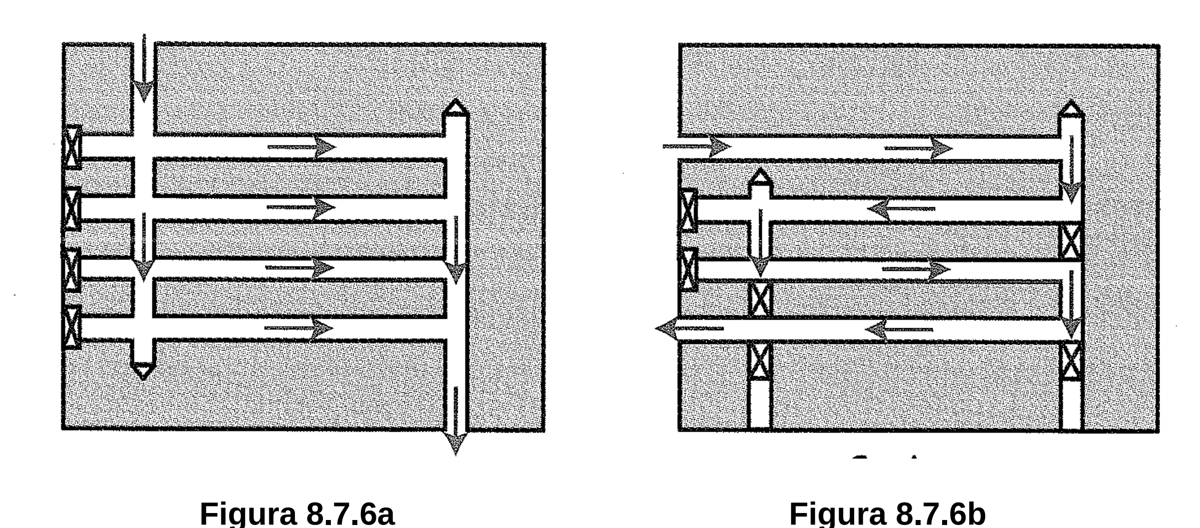
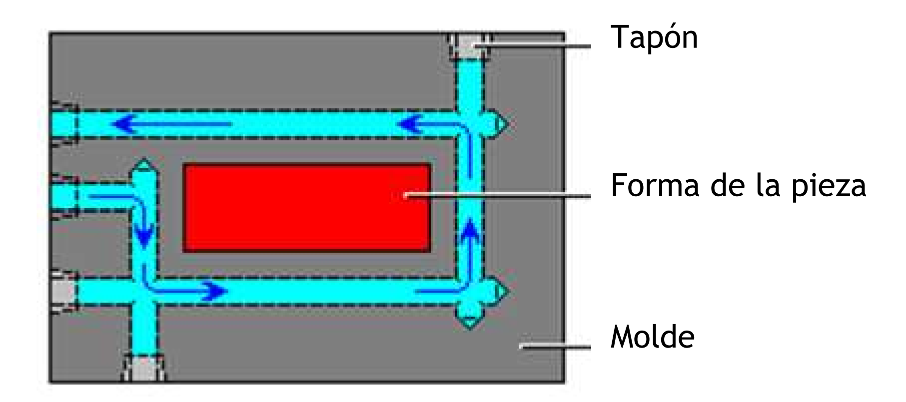


Figura 8.7.6a **Figura 8.7.6b**

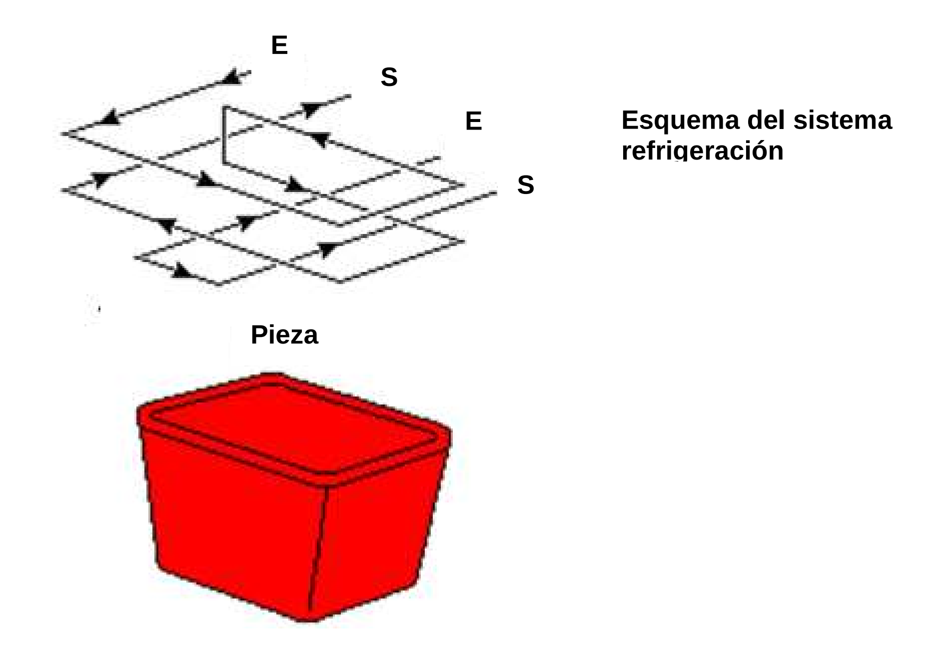
En la refrigeración en serie el refrigerante recorre sucesivamente el perfil de la pieza, variando su efecto sobre la pieza, a medida que va aumentando su temperatura.

El circuito en paralelo el efecto del refrigerante sobre la pieza es idéntico en todo su perfil.





En piezas de profundidad es necesario realizar los canales en diferentes planos

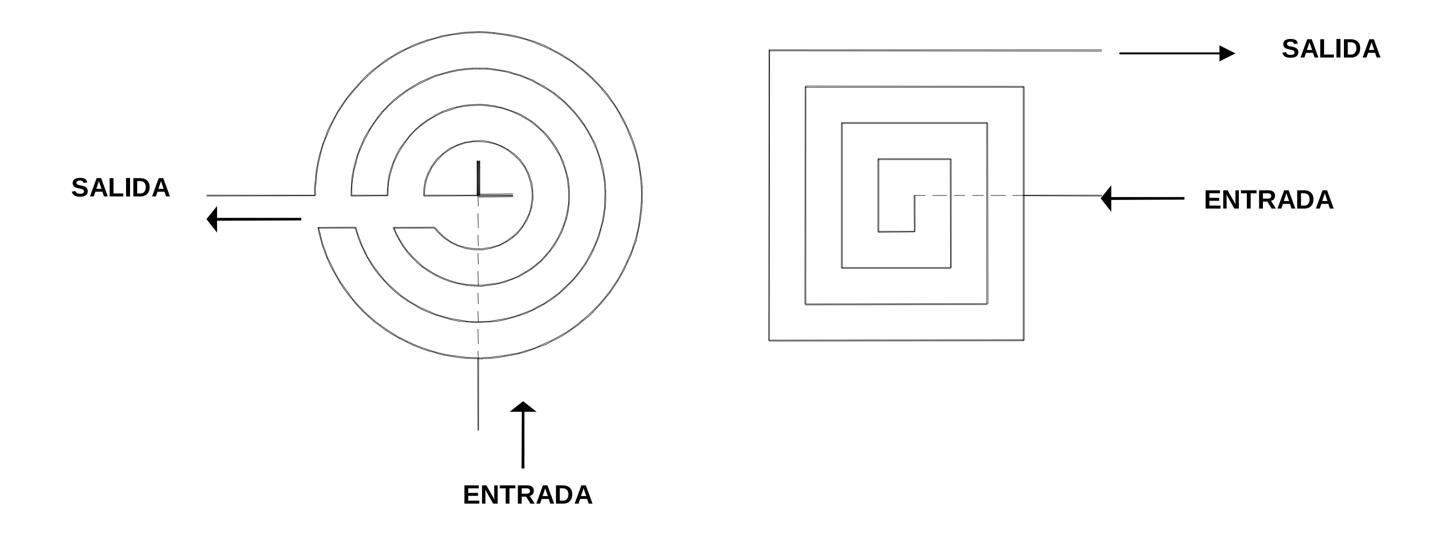


8.7.7 Refrigeración en espiral

El sistema de enfriamiento por medio de canales en espiral, se emplea, preferentemente para piezas planas de sección circular inyectadas del centro, como pueden ser piezas tipo platos, vasos, diafragmas, etc.

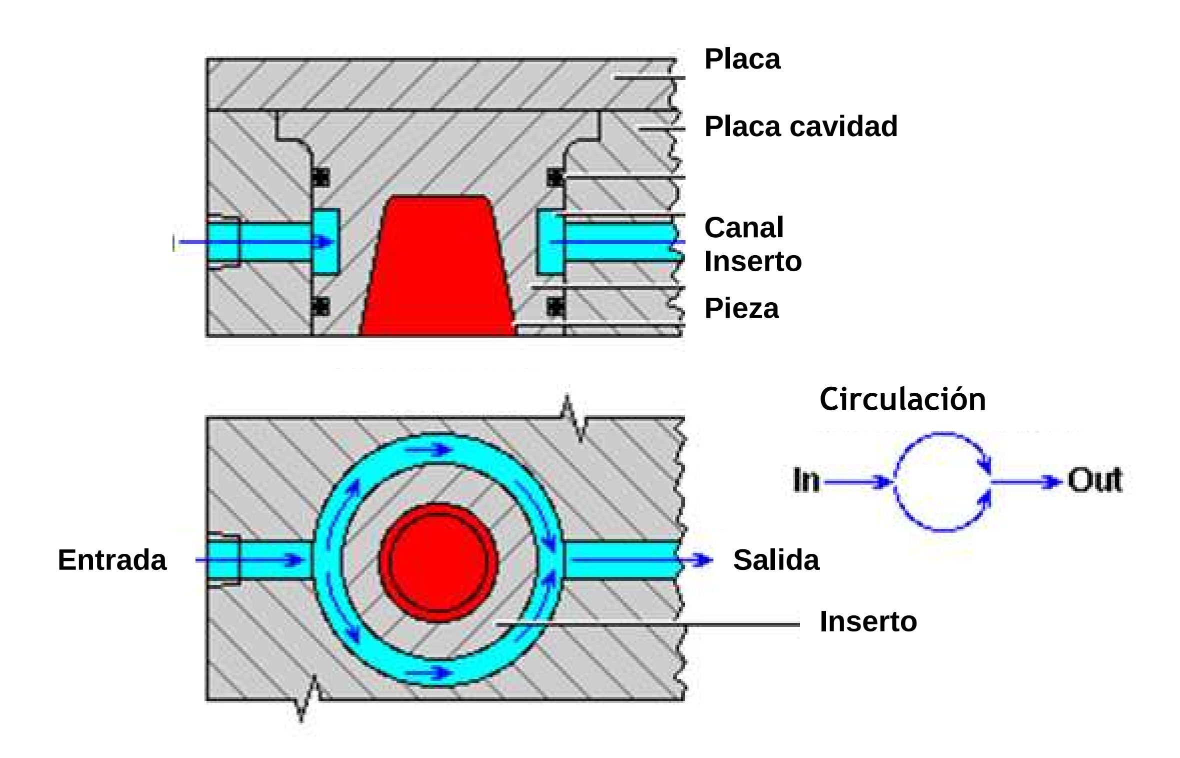
La espira se mecaniza según el perfil de la pieza, pero los más utilizados son el perfil circular y rectangular, **Figura 8.7.7.**

El refrigerante entra por el centro (Punto caliente) y circula hacia los extremos de la pieza para su salida al exterior.





8.7.8 Refrigeración directa de insertos circulares





8.7.9 Refrigeración de núcleos.

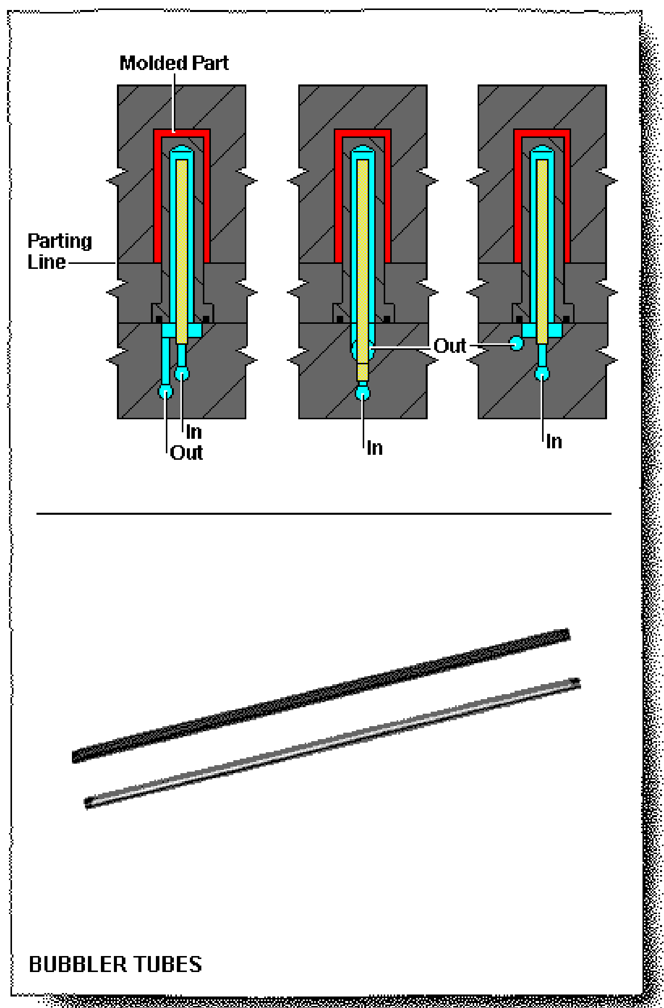
8.7.9.1 Refrigeración dactilar. **Figura 8.7.9.1**

Se utiliza para la refrigeración de núcleos largos de diámetro pequeño, por ejemplo, piezas tipo tubo.

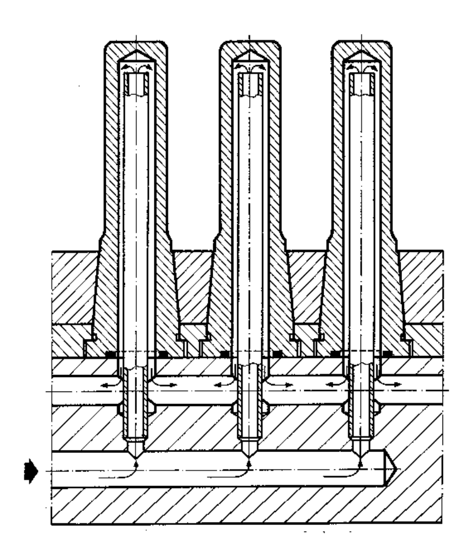
Para su montaje se realiza un taladro en el centro del núcleo y se introduce el tubo dactilar, tal como se ve en la ***Figura.***

El refrigerante es enviado por el interior del tubo para salir por la parte superior donde sale para bajar por el espacio existente entre el diámetro exterior del tubo y el orificio realizado, hasta encontrarse con la salida.

Este sistema es ideal para componentes con entradas de inyección situadas en oposición a la cara del núcleo, entradas de tipo capilar, ya que el recorrido realizado por el refrigerante esta de acuerdo con las pautas recomendadas para configurar un circuito de refrigeración. Actuación inicial en el punto más caliente (punto de inyección) y recorrido del refrigerante en el sentido del flujo del material.



Refrigeración dactilar, para la refrigeración de núcleos en paralelo





8.7.9.2 Refrigeración con lámina. ***Figura***

Es utilizado para refrigerar secciones estrechas, por ejemplo entre nervios consecutivos.

Para su montaje se realiza un agujero ciego a 90º a través del canal de refrigeración y se introduce el componente laminar, lamina de sección rectangular, que divide al orificio en dos secciones.

El refrigerante enviado de la bomba choca con la lámina y sube hasta la parte superior del núcleo, para bajar por el lado opuesto para encontrarse con el agujero de salida. Este sistema en general se utiliza para una refrigeración en serie de núcleos o detalles de los componentes.

Straight Baffle Parting Line Molded Part Spiral Baffle In Out Pressure Plug Baffle In Out TOP VIEW STRAIGHT AND SPIRAL BAFFLES	Refrigeración laminar, aplicado para la refrigeración de núcleos en serie.



8.7.9.3 Refrigeración espiral

Así como se realiza una refrigeración espiral en piezas de sección plana, es posible realizar el mismo tipo de sistema de refrigeración para los núcleos.

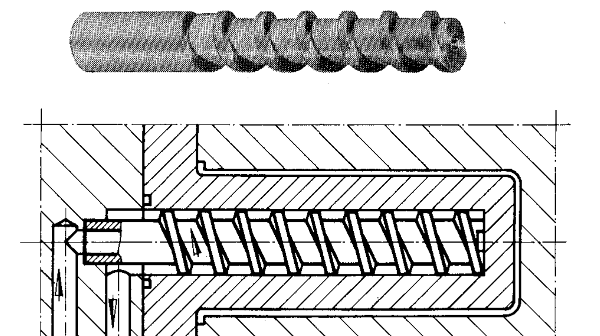
Se consigue por mecanizado en el inserto o utilizando elementos comerciales. Son elementos de sección circular a los que se les ha mecanizado un surco en espiral en su diámetro exterior.

Hay de tipos: Simple espiral y doble espiral.

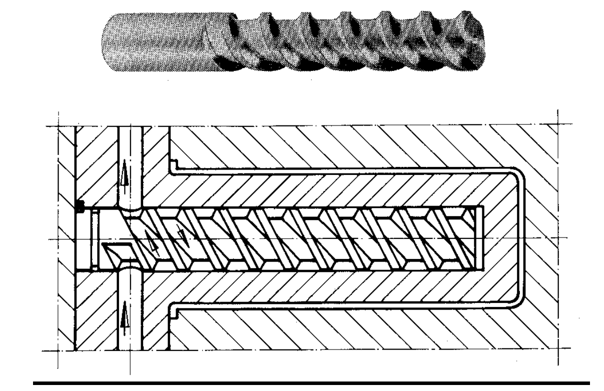
Simple espiral: Tiene un orificio interior para la subida del refrigerante hasta la parte superior y baja por el exterior aprovechando la espiral. Ideal para sistema en paralelo.

Doble espiral: Tienen mecanizado una doble espiral (doble entrada) en el diámetro exterior, una de las espiras sirve para elevar el refrigerante hacia la parte superior y la otra para el descenso. Ambas estas conectadas en la parte superior. Ideal para sistema en serie.

Simple espiral



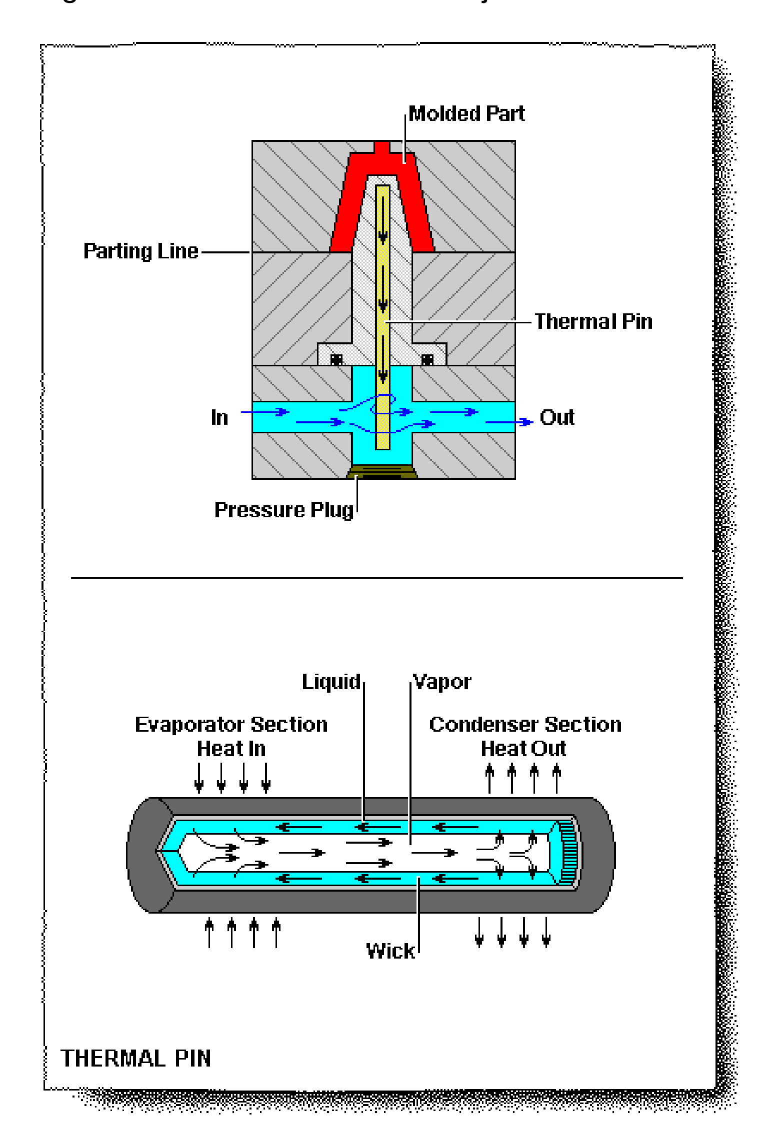
Doble espiral





8.7.9.4 Cartucho termo conductor.

Se compone de un cilindro hueco a prueba de presión rellenada con agua o gas. Transporta gran cantidad de calor con bajas diferencias de temperatura.



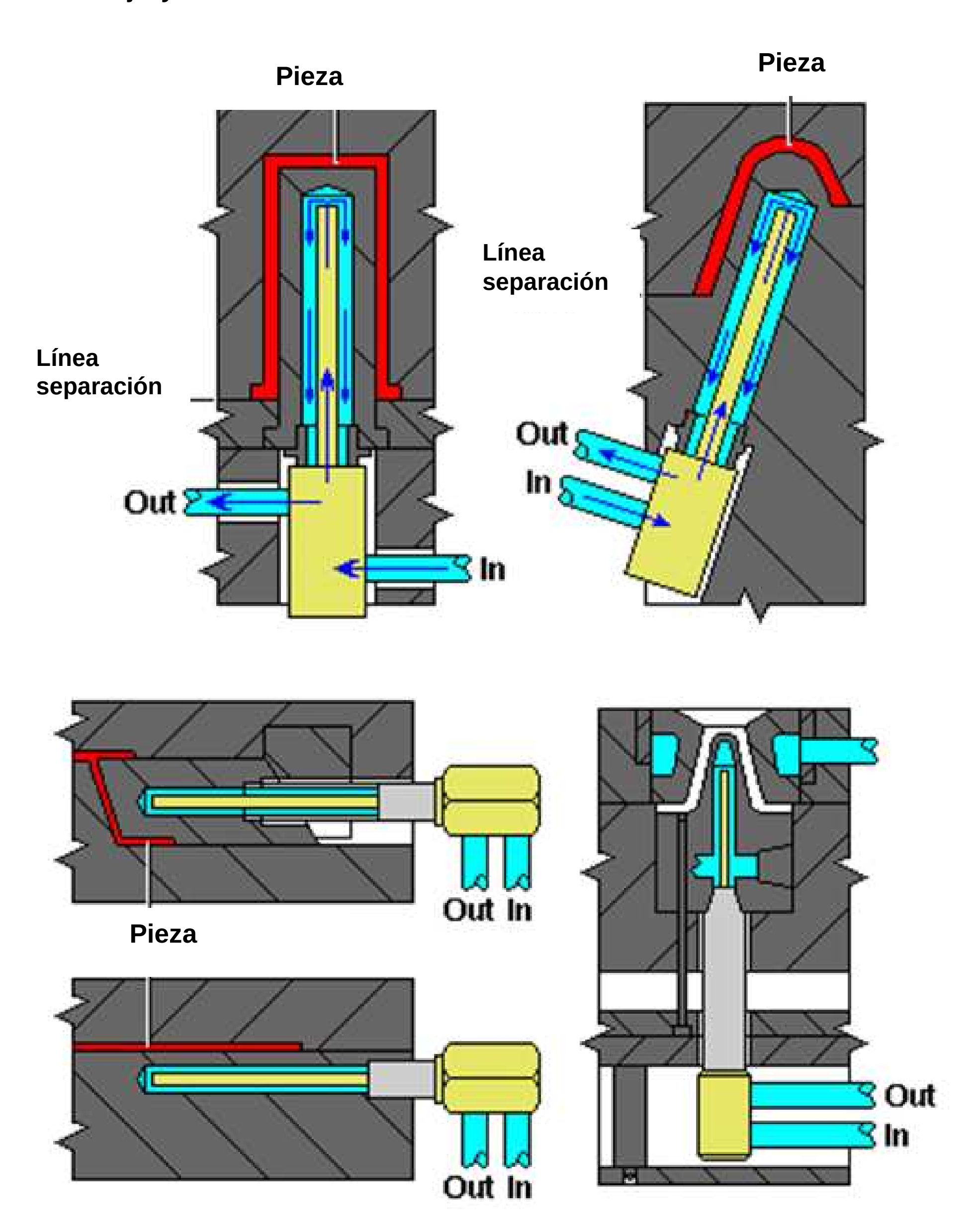
Características especiales del sistema:

- Apropiado para núcleos largos con una sección extremadamente pequeña.
- Posibilidad de montaje en cerca del contorno del molde.
- Posibilidad de montaje en zonas donde por la división del molde no interesa el paso de refrigerante.
- Reduce los costos de mecanizado.
- Bajo consumo de refrigerante
- Mejora las marcas de rechupes.
- Fácil mantenimiento.



8.7.9.5 Refrigeración en cascada

Se utilizan para enfriar los núcleos, correderas o zonas de difícil acceso de los moldes. Refrigerante entra en la conexión inferior y viaja hasta el centro del tubo, se derrama como una fuente, refrigeración 360 grados, a medida que fluye hacia abajo y el conector adecuado.





Calefacción del molde

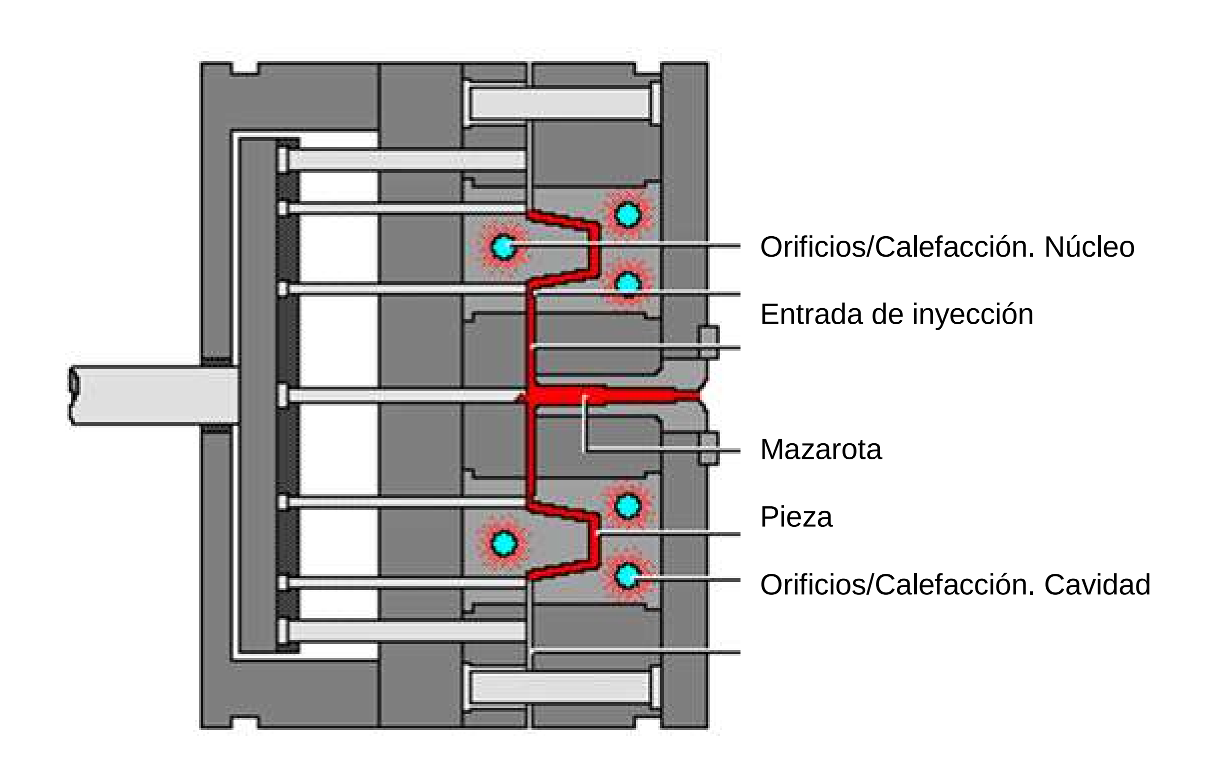
Una de las funciones principales de cualquier fluido que circula por el molde es controlar la velocidad de transferencia de calor, o la velocidad de enfriamiento de la resina plástica. Temperaturas altas se requieren cuando es necesario un enfriamiento lento o por las propiedades de la resina. Por lo tanto, en función de la resina se necesita un control de la temperatura del molde, calefacción o enfriamiento.

La calefacción se hace necesaria cuando la pérdida del calor es mayor que la suministrada por el material.

Con temperaturas elevadas del molde la cantidad de calor disipado hacia el ambiente puede ser superior a la aportada por la masa inyectada. En este caso, el fluido que sirve de agente moderador tiene que aportar calor, a fin de garantizar, en la pared del molde, la temperatura; entonces no hay refrigeración, sino calefacción. Por ello, en sentido estricto, no son correctas las denominaciones de canales de enfriamiento sino que son más apropiadas denominarles canales de acondicionamiento o de atemperado del molde.

Medios para calentar el molde

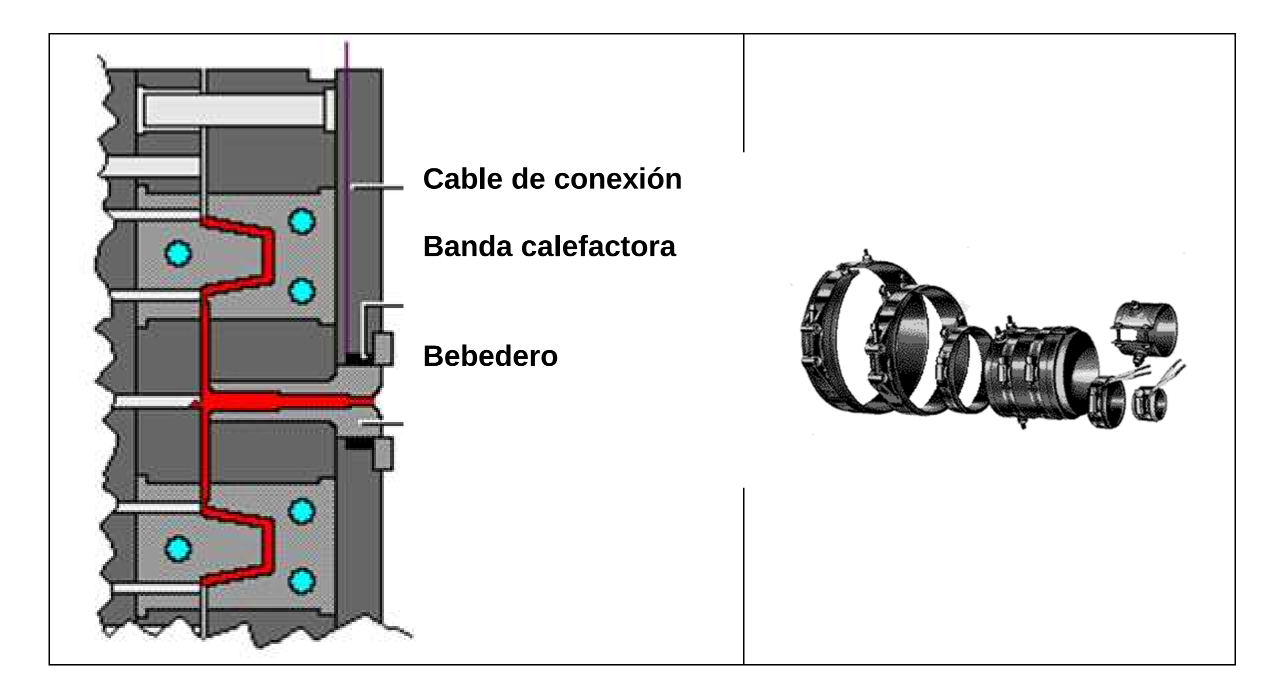
Se utilizan típicamente tres medios para el calentamiento del acero del molde: Agua caliente, vapor o aceite caliente.





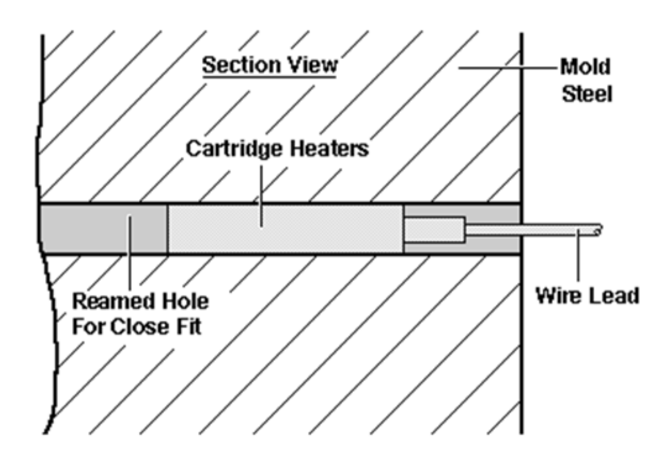
Calefacción. Componentes utilizados como fuentes de calor o elementos de control de temperatura.

Bandas de calefactora



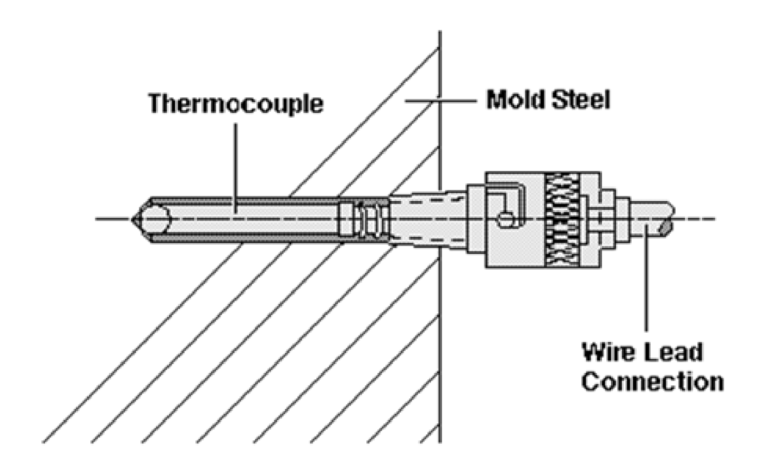
Cartuchos calefactores. Para elevar la temperatura en zonas específicas. Se utilizan en moldes de canal caliente

Un primer plano, un ajuste cómodo, es muy importante para la eficiencia y la vida

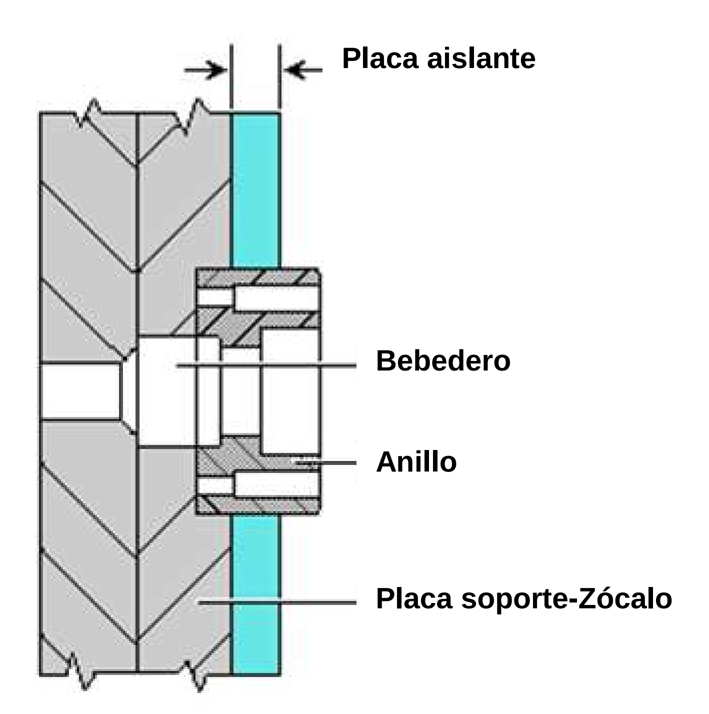




Termopares. Se utilizan para la medición de la temperatura, en la zona tornillo de inyección, la boquilla y en la base del molde. Ellos proporcionan retroalimentación para los calentadores, refrigeración o la temperatura del molde de acero. Algunos calentadores tienen un termopar construido adentro Hay una variedad de estilos disponibles en función de la aplicación. Se debe estar bien sujeto y protegido de la contaminación



Placa aislante. Cuando se trabaja con altas temperaturas del molde, se introducen placas aislantes para evitar la pérdida de calor del molde y para inhibir la transferencia de calor con las mesas de la máquina transformadora.





Pirómetros digitales. Para medir la temperatura de las superficies exteriores





Introducción: Defectos de las piezas y medidas correctoras

Si una pieza se ha fabricado satisfactoriamente y sale mal, algo ha cambiado, El principio a seguir no es cambiar inmediatamente las condiciones. Es preciso *identificar y subsanar la causa*.

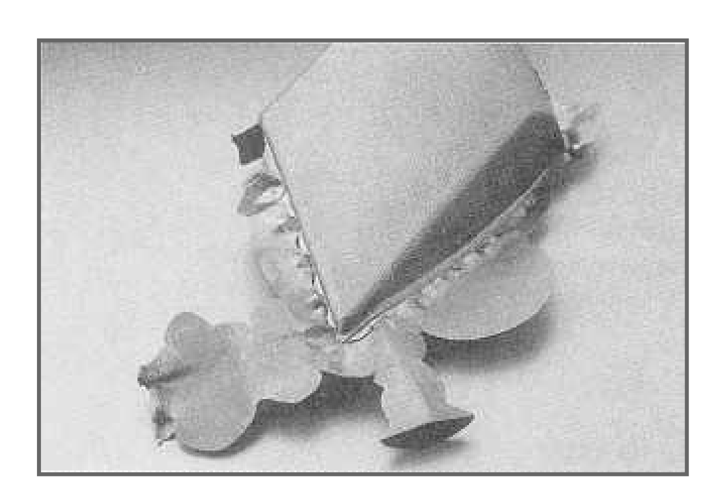
Hágase preguntas para identificar las causas de los defectos:

- ¿Qué ha cambiado?
- ¿Cuándo comenzó?
- ¿Con qué frecuencia ocurre?
- ¿Ocurre el fallo el azar o siempre en el mismo sitio?

Si es necesario, compruebe el correcto funcionamiento de la máquina (fallos en el control de la velocidad de inyección, velocidad del husillo, contrapresión, temperatura de la masa fundida, temperatura del molde, cojín del material, fuerza de cierre...).



Rebabas



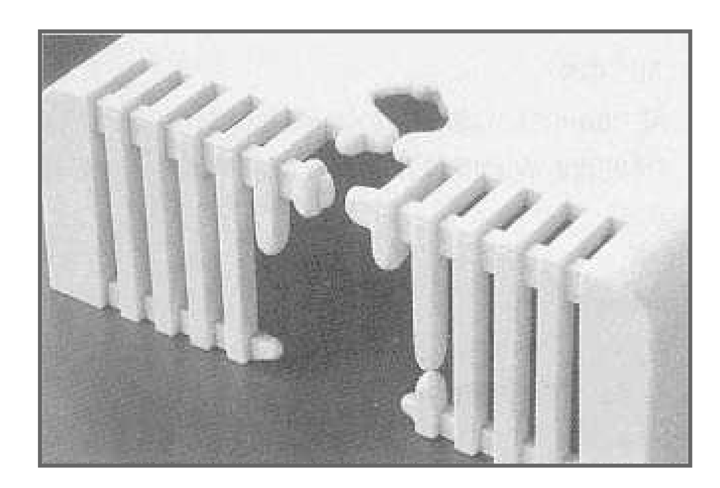
DESCRIPCIÓN:
Película de material unida a la pieza moldeada en la línea de partición del molde. Es uno de los peores problemas en la inyección, puesto que si el molde se cierra con un trozo de rebaba, la presión de cierre dañará el plano de partición, con lo que la calidad del cierre entre las dos mitades del molde empeora y en posteriores inyectadas la rebaba será aún mayor. Las rebabas deben evitarse. El desbarbado posterior es sólo un mal menor comparado con el daño que la rebaba puede ocasionar sobre el molde.

En la mayoría de los casos la rebaba crece en la línea de partición del molde, pero también puede aparecer alrededor de expulsores o de machos para contrasalidas. Esta rebaba se denomina vertical, y se debe a una falta de ajuste del molde.

Causa	Solución o verificación sugerida
Presión excesiva en cavidad.	• Verificar que el llenado está balanceado. • Reducir la velocidad de inyección. • Reducir la presión de mantenimiento. • Reducir el tiempo de mantenimiento.
Apertura del molde bajo presión.	• Verificar que el área proyectada del molde está dentro de la capacidad de cierre de la máquina. • Aumentar la fuerza de cierre.
Las cavidades del molde ajustan mal.	• Verificar que no hay suciedad sobre la superficie de las caras del molde. • Verificar la deformación del molde. • Verificar que las salidas de gases no sean demasiado grandes. • Verificar la resistencia del molde (incrementar el espesor de la placa o cambiar de material).
Material demasiado fluido.	• Reducir la temperatura del material. • Reducir la velocidad de inyección. • Cambiar a resina de menor MFI.



Inyectadas cortas

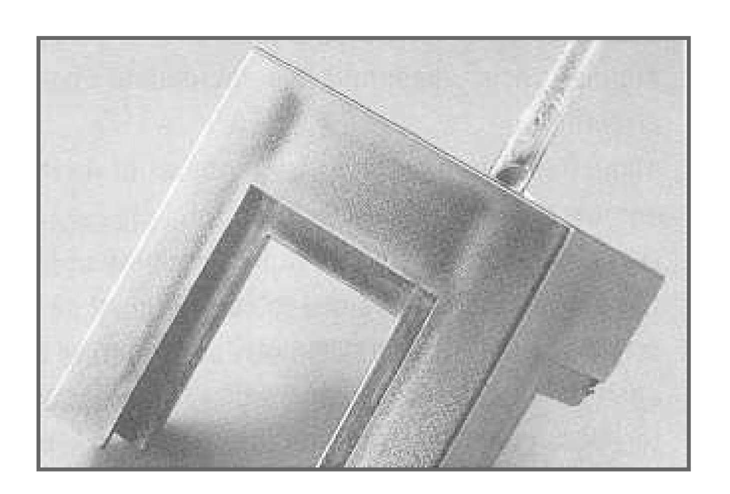


DESCRIPCIÓN:
Es el resultado del llenado incompleto del molde.

Causa	Solución o verificación sugerida
Volumen de inyección insuficiente.	• Verificar el colchón. Pasar a máquina más grande si es necesario. • Verificar que la plastificación se completa antes de la inyección.
El material se congela en la cavidad antes de llenarse el molde.	• Aumentar la velocidad de inyección. • Aumentar la temperatura del molde. • Aumentar la presión de inyección. • Aumentar la temperatura del material.
Longitud de flujo excesiva.	• Aumentar el número de entradas. • Usar una resina de mayor MFI.
Llenado restringido.	• Aumentar la salida de gases. • Aumentar el Ø de la boquilla. • Aumentar el tamaño de la entrada y reducir su longitud. • Aumentar el Ø de la mazarota o bebedero y canales de alimentación.
Atrapamiento de aire en el interior de la pieza.	• Cambiar la posición de las entradas.



Rechupes



DESCRIPCIÓN:
Los rechupes son depresiones superficiales que aparecen en la superficie de la pieza, y se deben a un empacado local insuficiente. Un nervio fuerte que discurra junto a una pared delgada puede provocar estas marcas en la superficie del lado contrario. Son muy difíciles de eliminar variando las condiciones de transformación, por lo que se debe poner cuidado en la etapa de diseño. Una presión posterior demasiado alta (inútil cuando las entradas son demasiado pequeñas) crea tensiones residuales muy altas en las zonas de entrada.

Causa	Solución o verificación sugerida
Volumen de inyección insuficiente.	• Verificar el colchón. • Verificar que la plastificación se completa.
Mantenimiento insuficiente.	• Aumentar la presión de mantenimiento. • Aumentar el tiempo de presión de mantenimiento. • Verificar conmutación adecuada (no prematura). • Aumentar la velocidad de inyección al rango máximo.
	• Reducir la velocidad de inyección (piezas gruesas con entrada restringida). • Aumentar el tamaño de la entrada y reducir su longitud. • Aumentar la salida de gases. • Aumentar Ø de boquilla o bebedero y canales.
Piel demasiado blanda (eliminar rechupe a costa de la aparición de vano).	• Reducir la temperatura del molde. • Reducir la temperatura del fundido.
Diseño de producto inadecuado.	• Llenar la pieza por la sección más gruesa. • Diseñar el producto con espesores uniformes. Incluir detalles que disimulen el rechupe (texturizado, rebajes…).
Enfriamiento no homogéneo.	• Incrementar la velocidad de enfriamiento en las zonas donde se dé el rechupe.
Contracción excesiva.	• Usar grado de mayor MFI, preferiblemente un copolímero (menor cristalinidad). • Usar un grado cargado con espumante.



Vanos (Burbujas)

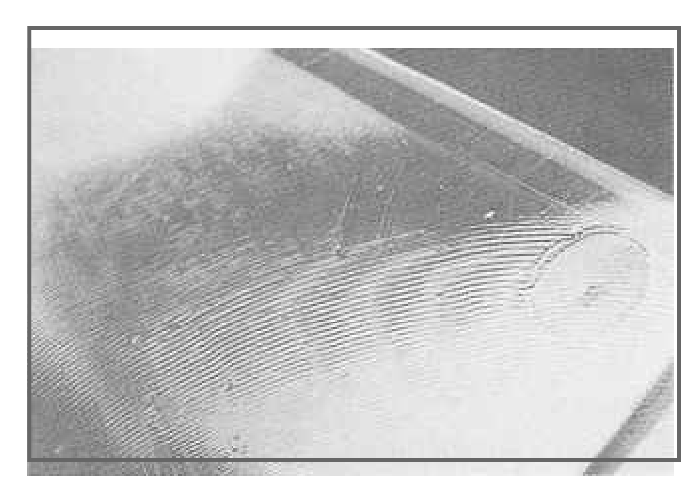
Los vanos o burbujas se deben, al igual que los rechupes, a un mantenimiento insuficiente. En este caso, cuando el mantenimiento deja de ser efectivo (por ejemplo, debido a la congelación de la entrada), y el núcleo fundido de la pieza sigue contrayendo, la presión atmosférica no es capaz de "hundir" la piel de la pieza debido a su rigidez. Por ello aparece un "rechupe interno". En general, los remedios sugeridos son similares a los propuestos para evitar rechupes.

Una causa adicional es la presencia de material volátil (véase la tabla).

Causa	Solución o verificación sugerida
Volumen de inyección insuficiente.	• Verificar el colchón. • Verificar que la plastificación se completa.
Mantenimiento insuficiente.	• Aumentar la presión de mantenimiento. • Aumentar el tiempo de presión de mantenimiento. • Verificar conmutación adecuada (no prematura). • Aumentar la velocidad de inyección al rango máximo. • Reducir la velocidad de inyección (piezas gruesas con entrada restringida). • Aumentar el tamaño de la entrada y reducir su longitud. • Aumentar la salida de gases. • Aumentar Ø de boquilla o bebedero y canales.
Piel demasiado blanda (eliminar rechupe a costa de la aparición de vano).	• Reducir la temperatura del molde. • Reducir la temperatura del fundido.
Piel demasiado rígida.	• Aumentar la temperatura del molde (el vano puede pasar a dar un rechupe).
Agua o material volátil, provenientes de la resina o de algún aditivo.	• Secar la resina. • Reducir la temperatura del fundido. • Reducir el tiempo de residencia.



Marcas de flujo (surcos de disco)

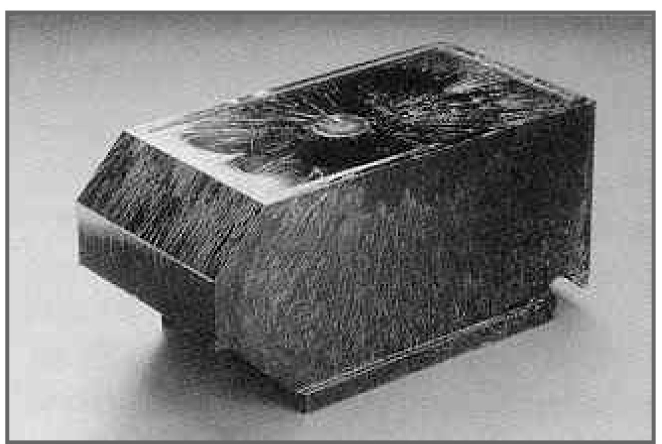


DESCRIPCIÓN:
Marcas onduladas (parecidas a los surcos de los discos de vinilo), generalmente cerca de la entrada. El material entra en el molde frío a baja velocidad y su piel se congela antes del contacto real. La masa fundida que viene a continuación fluye sobre el material enfriado, y se repite el ciclo.

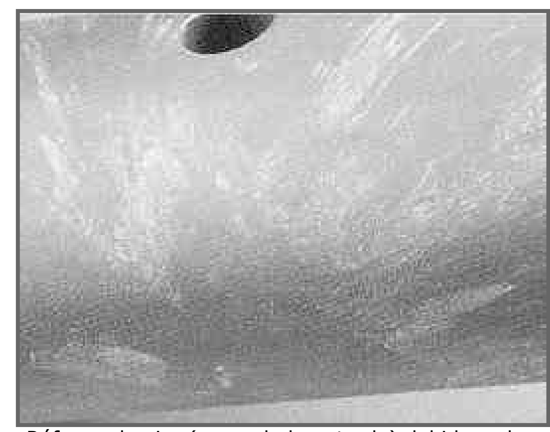
Causa	Solución o verificación sugerida
Congelación de la piel en la masa entrante.	• Aumentar la temperatura del molde. • Aumentar la temperatura del fundido.
Baja velocidad de llenado.	• Aumentar la velocidad/presión de inyección. • Agrandar la boquilla, mazarota, canales o entradas.
Pozo frío pequeño.	• Agrandar el pozo frío para evitar que entre el tapón frío en la cavidad.



Ráfagas plateadas




Ráfagas debidas a la excesiva humedad del material.

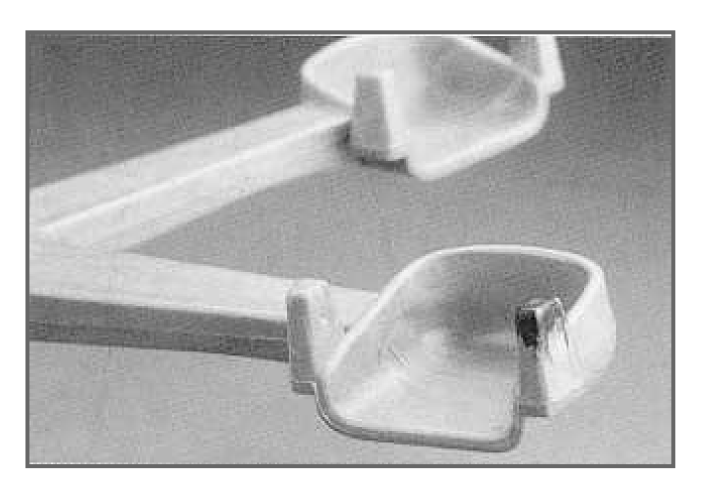

Ráfagas de aire (cerca de la entrada) debidas a la absorción de aire durante el rechupe.

DESCRIPCIÓN:
Las ráfagas son casi siempre resultado de humedad en los gránulos (secado inadecuado del material). Tienen aspecto de vetas plateadas.
También pueden ser debidas a otros gases, como aditivos volátiles o gases generados por la degradación de la resina. Una última causa es la absorción de aire en la descompresión al final de la plastificación.

Causa	Solución o verificación sugerida
Humedad en el material.	• Secar más tiempo o con un equipo más adecuado. • Reducir el tiempo de residencia en la tolva de la máquina.
Degradación de la resina.	• Disminuir las temperaturas del cilindro. • Reducir el tiempo de residencia en el cilindro. • Aumentar Øde boquilla y/o entrada. • Disminuir la velocidad de giro del husillo. • Aplicar una contrapresión adecuada.
Aire mezclado con la resina durante la plastificación.	• Reducir la carrera del rechupe.



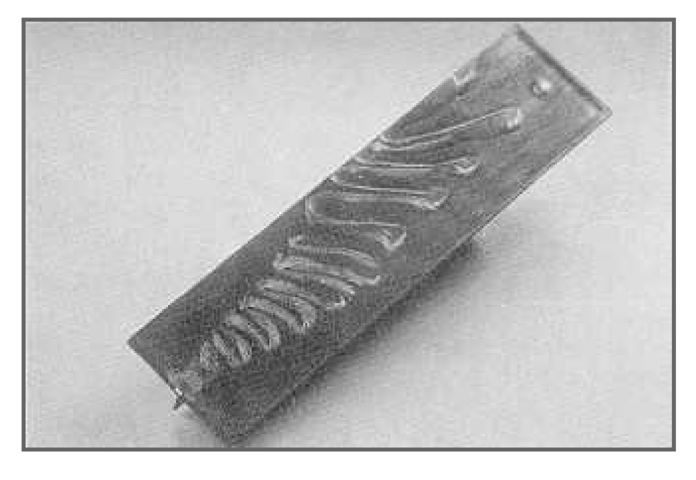
Marcas de quemado / efecto diesel



DESCRIPCION:
Las marcas de quemado son con frecuencia vetas marrones o negras. Generalmente son debidas al sobrecalentamiento del material consecuencia del aire atrapado (efecto diesel).

Causa	Solución o verificación sugerida
Aire atrapado en la cavidad del molde.	• Aumentar la salida de gases. • Reducir la velocidad de inyección. • Limpiar el plano de partición. • Reducir la temperatura del material. • Cambiar la posición de la entrada.

Chorro libre (Jetting)



DESCRIPCIÓN:
Aparece sólo con entradas laterales. El primer chorro de masa fundida entra en la cavidad a alta velocidad y no encuentra ningún obstáculo que le frene, por lo que en lugar de pegarse a las paredes de la cavidad y llenarla gradualmente, se pasa de largo. Al enfriarse, no se fusiona homogéneamente con la masa fundida que viene a continuación y se distingue como una línea serpenteante en la superficie de la pieza.

Causa	Solución o verificación sugerida
Entrada inadecuada.	• Modificar la posición o el ángulo de la entrada, buscando choque contra una pared. • Utilizar otro tipo de entrada. • Aumentar el tamaño de la entrada. Un espesor de 0,7 · t puede evitar el jetting por hinchamiento del fundido.
Velocidad de inyección demasiado alta.	• Reducir la velocidad de inyección.
Congelación prematura de la piel en el chorro entrante.	• Aumentar la temperatura del molde. • Aumentar la temperatura del fundido.



Líneas de soldadura

DESCRIPCIÓN:
Aparecen siempre que dos frentes de flujo de plástico se encuentran en el molde. Constituyen un defecto en el caso de que la marca sea visible y el cliente la considere inaceptable o sean un punto débil de la pieza. En ambos casos, el motivo es que los frentes de flujo se han enfriado demasiado cuando se encuentran.

Para disimular el efecto visual de las líneas de soldadura, suelen emplearse habitualmente superficies texturizadas.

Causa	Solución o verificación sugerida
Frentes de flujo demasiado fríos.	• Aumentar la velocidad de inyección. • Aumentar la temperatura de la masa fundida. • Aumentar la temperatura del molde. • Aumentar el número de entradas para reducir la longitud de flujo.
Presión de mantenimiento insuficiente.	• Aumentar la presión de mantenimiento. • Verificar el colchón. • Agrandar el sistema de entradas.
Desgasificación inadecuada.	• Verificar la desgasificación.



Deformación y alabeamiento

DESCRIPCIÓN:
Deformación dimensional de la pieza moldeada consecuencia de tensiones internas. Es más probable cuanto más caliente se extraiga la pieza. La causa es la contracción diferencial, debida a:

- Orientación diferencial (o diferente grado de orientación en la dirección de flujo y en la transversal) en piezas con diferentes direcciones de flujo.
- Enfriamiento diferencial (diferentes temperaturas del molde o diferentes espesores de pieza).
- Compactación diferencial (diferentes presiones en el molde).

Causa	Solución o verificación sugerida
Contracción diferencial debido a orientación diferencial (se debe reducir la presión de inyección necesaria).	• Aumentar la velocidad de inyección si se sospecha enfriamiento excesivo del fundido en el llenado. • Aumentar la temperatura del material. • Aumentar la temperatura del molde. • Usar un grado de mayor MFI o de "reología controlada" (CR). • Cambiar la posición de las entradas, para modificar el patrón de flujo. • Aumentar el número de entradas.
Contracción diferencial debido a enfriamiento diferencial.	• Modificar caudales en los circuitos de refrigeración de ambos semimoldes. • Invertir las conexiones de agua para invertir el gradiente de temperaturas (conectar salidas a entradas y viceversa). • Modificar el esquema del circuito de enfriamiento (buscar mayor enfriamiento donde se haya registrado mayor temperatura). • Rediseñar para dar espesor de pared uniforme. • Si las variaciones de espesor se deben a una flexión del núcleo, mejorar su posición y/o cambiar la posición de la entrada.
Enfriamiento insuficiente.	• Aumentar el tiempo de enfriamiento. • Reducir la temperatura del molde. • Reducir la temperatura del material.
Empacado insuficiente.	• Optimizar (aumentar) el TMP.
Expulsión inadecuada.	• Verificar el sistema de expulsión y mejorarlo.

El alabeo es debido a la contracción diferencial de la pieza. Los factores que afectan a la contracción son la orientación, el empacado y el enfriamiento. Por ello, una contracción diferencial se debe a:

- Empacado diferencial
- Orientación diferencial
- Enfriamiento diferencial



Deformación y alabeamiento

Empacado o compactación diferencial

El sobreempacado es debido al flujo no balanceado o a la aplicación de un TMP excesivo. Las zonas más empacadas contraen menos, hay una contracción diferencial y la pieza se deforma. La única solución posible al flujo no balanceado es un diseño de pieza / molde adecuado.

Deformación dimensional y perdida de planitud de la pieza moldeada como consecuencia de tensiones internas.

La causa es la contracción diferencial, debida a:

- Orientación diferencial (o diferente grado de orientación en la dirección de flujo y en la transversal) en piezas con diferentes direcciones de flujo.

- Enfriamiento diferencial (diferentes temperaturas del molde o diferentes espesores de pieza)

- Compactación diferencial (diferentes presiones en la cavidad del molde).

Orientación diferencial

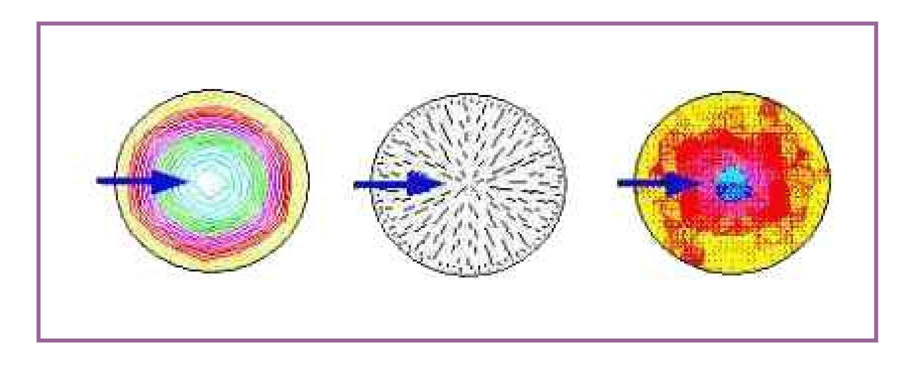
Los materiales polímericos no contraen de la misma forma en la dirección de flujo y en la dirección transversal. En el capítulo anterior se han comentado piezas que darían deformación debido a contracción diferencial.

Respecto a las condiciones de proceso, la diferencia de contracción se reduce si se trabaja con mayores temperaturas de molde y fundido al permitir la desaparición (la orientación residual es menor).

En cuanto al material, los materiales que contraen poco (amorfos o polímeros con carga mineral) presentan menores problemas de alabeamiento o perdida de planitud debido a orientación diferencial.



Por ejemplo, si se llena un disco desde su centro, las cadenas moleculares quedarán orientadas radialmente y existirá una contracción diferencial radial y tangencialmente, provocando un alabeamiento o pérdida de planitud del disco.





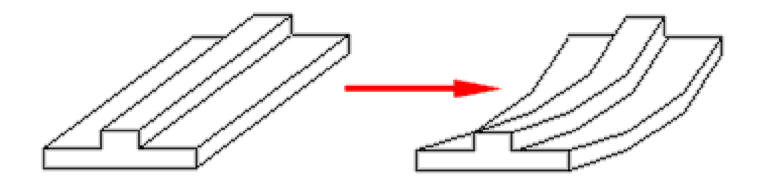
Deformación y alabeamiento

Enfriamiento diferencial

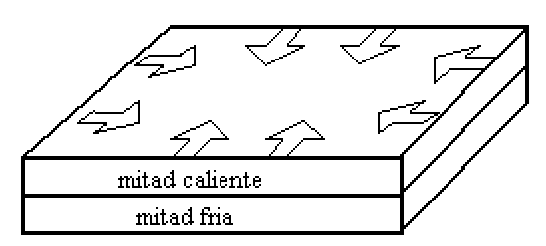
Cuando las distintas partes de la pieza tienen una historia de enfriamiento diferente, también puede haber deformación. Esta situación puede encontrarse en:

1.- Piezas de espesor variable.

Las regiones gruesas/delgadas tardan distinto tiempo en enfriar, y contraen distinto (ver capítulo anterior). Para una contracción uniforme se requieren piezas de espesor constante, lo que mejora la calidad de la pieza. Ejemplo de deformación en pieza con distintos espesores:



2.- Moldes con distinta temperatura en las dos mitades. Supongamos una pieza cuya temperatura de congelación es 100 ºC. Por simplificar, vamos a dividirla en únicamente dos regiones de temperatura, que son la cara inferior y la superior. Supongamos que la cara inferior se congela rápidamente hasta los 30 ºC, mientras que la superior sigue fundida. La capa inferior se ha contraído durante esta etapa, pero la superior, fundida, ha podido fluir y adaptarse a la contracción de la capa inferior. Cuando la capa superior se enfría desde los 100 ºC hasta los 30 ºC, se contrae (ver figura). Pero, ahora la interfase entre la capa superior y la inferior es rígida, ambas están fijadas la una a la otra, por lo que la capa superior al contraerse crea tensiones que arquean la pieza. La pieza se deforma en forma de cúpula, quedando hacia el interior la parte en contacto con la mitad del molde que estaba caliente.

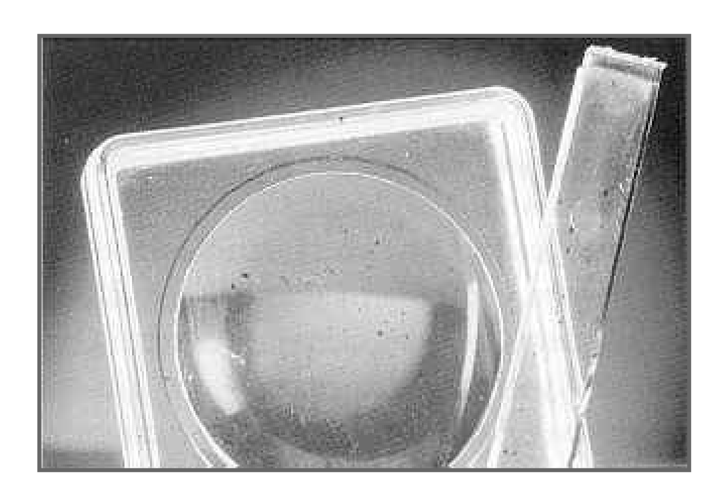


Esta deformación es mayor cuanto más contrae el material. Así, en los materiales cristalinos la influencia de la temperatura de las paredes del molde en la deformación, es mucho mayor que en materiales amorfos. Además, en cristalinos, si se enfría una mitad demasiado rápido puede no darse tiempo a que desarrolle la cristalinidad. Pueden aparecer procesos de cristalización diferencial entre ambas caras días después del procesado, que darán lugar a una deformación post-procesado. Para evitar este tipo de deformación, debe tenerse cuidado de procesar con iguales temperaturas en ambos semimoldes.

Por último, debe tenerse en cuenta que refrigerar núcleos o partes angulosas del molde puede resultar difícil, por lo que las piezas con estas geometrías suelen presentar algún grado de deformación debido al enfriamiento diferencial.



Puntos negros



DESCRIPCION:
Pequeñas zonas negras (manchas) en el interior del material, visibles en las resinas transparentes. Este defecto aparece en el PC: si se enfría dentro de un cilindro por debajo de su Tg (150 ºC), puede pegarse a las paredes y arrastar en operaciones posteriores trozos de metal. Estos puntos negros son muy persistentes y difíciles de purgar.
En caso de que el defecto aparezca en una máquina en la que no se ha empleado PC, las causas pueden ser:

Causa	Solución o verificación sugerida
Degradación del material.	• Reducir la temperatura del material. • Verificar la existencia de puntos muertos en boquilla, válvula antirretorno y cámara caliente. • Cambiar a máquina más pequeña. • Purgar la maquina tras tiempos de parada largos.
Impurezas.	• Verificar ausencia de impurezas en los gránulos. • Purgar la unidad de plastificación.

Cordones

DESCRIPCION:
Se trata de la aparición de un hilo de plástico delgado que en el desmoldeo une la mazarota con la boquilla de la máquina. Es típico de materiales estirénicos.

Causa	Solución o verificación sugerida
Masa fundida demasiado fluida en la boquilla.	• Reducir la temperatura de la boquilla.
Descompresión insuficiente.	• Aumentar la velocidad de descompresión. • Reducir la contrapresión.



Veteado o motas

DESCRIPCIÓN:
La pieza no tiene un color uniforme, sino que se observan vetas de distinto color.

Causa	Solución o verificación sugerida
Pobre dispersión del pigmento o de la mezcla madre (masterbatch).	• Mejorar el proceso de mezclado. • Aumentar la contrapresión sobre el husillo. • Aumentar la velocidad del husillo.
Material degradado o contaminado.	• Usar menos retriturado. • Reducir la temperatura del material. • Reducir tiempo de residencia en cilindro cambiando a una máquina más pequeña. • Verificar la contaminación en la alimentación y asegurarse de que el cilindro y la boquilla están limpios, y no existen puntos de retención. • Usar grado de mayor MFI.

Contracción distinta a la esperada

DESCRIPCIÓN:
El material se contrae en una cantidad distinta a la esperada, por lo que no se guardan las tolerancias.

Causa	Solución o verificación sugerida
Contracción demasiado baja (se desea una pieza más pequeña).	• Aumentar la temperatura del molde. • Aumentar la temperatura del material si la entrada es gruesa (alto tiempo de congelación) y puede aplicarse baja presión. • Reducir la presión de inyección. • Reducir el tiempo de mantenimiento.
Contracción demasiado alta (se desea una pieza más grande).	• Reducir la temperatura del molde. • Reducir la temperatura del material si la entrada es gruesa. • Aumentar la temperatura del material si la entrada es pequeña (la entrada restringe el flujo de material y se busca aumentar la fluidez de éste para poder introducirlo en mayor cantidad). • Aumentar la presión de inyección. • Aumentar el tiempo de mantenimiento. • Aumentar el tamaño de la entrada. • Usar un grado de mayor MFI.
Contracción diferencial excesiva.	• Reducir la presión de inyección y elevar la temperatura del material. • Verificar una temperatura correcta del molde. • Aumentar el número de entradas.



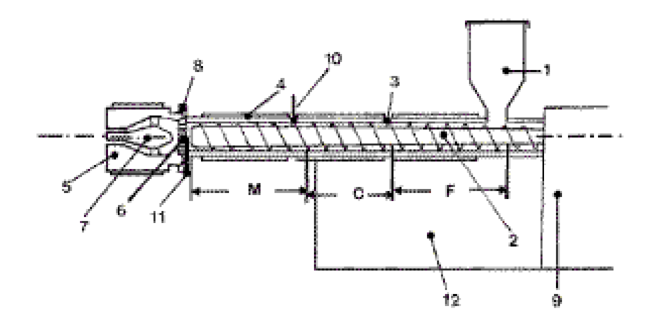
Pobre resistencia al impacto

DESCRIPCIÓN:
La pieza rompe facilmente al recibir un impacto. En un ensayo de impacto el material presenta pobres propiedades.

Causa	Solución o verificación sugerida
Propagación de fisuras desde las entallas (cantos agudos en la pieza).	• Redondear todas las esquinas agudas e intersecciones que puedan actuar como entallas.
Tensiones en la pieza.	• Aumentar las temperaturas del molde y del material. • Aumentar la velocidad de inyección. • Verificar un gradiente correcto de temperaturas en el molde (enfriamiento adecuado). • Aumentar el tamaño de la entrada si es demasiado pequeña (altas tensiones residuales en la entrada). • Mejorar la ventilación.
Material degradado o contaminación.	• Reducir la temperatura del material o el tiempo de residencia. • Utilizar menos triturado. • Verificar la contaminación.
Líneas de soldadura.	• Ver defecto "Líneas de soldadura".
Vanos.	• Ver defecto "Vanos".



Extrusión

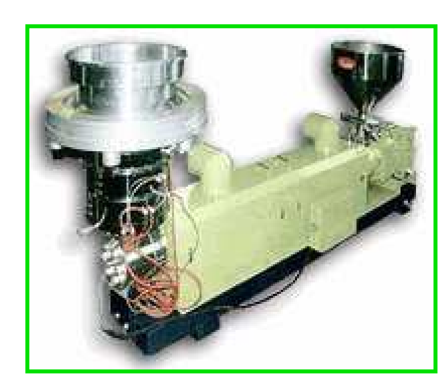


La extrusión consiste en ablandar o fundir el material y forzarlo a pasar a través de una boquilla que le da forma o extruye.

Las principales partes de una extrusora son: (1) tolva, (9) motor y caja reductora, (2) husillo, (3) cilindro, (4) resistencias eléctricas, (5) boquilla, (6) plato rompedor y paquete de mallas, (7) mandril de la boquilla, (8) cierre del cabezal, (10) termopares, (11) transductor de presión, (12) panel de control. (F), (C) y (M) se refieren a las zonas de alimentación, compresión y dosificación.

A continuación, vamos a estudiar algunos de estos componentes:

- Tolva
- Garganta de alimentación y cilindro
- Husillo o tornillo
- Cabezal
- Sistemas de calentamiento
- Sistemas de enfriamiento

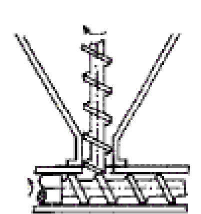


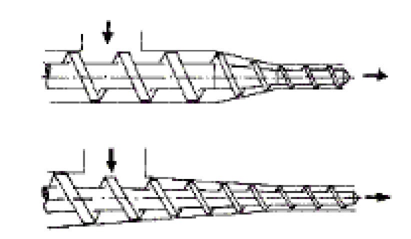


Tolva

La tolva suministra material a la extrusora. En la mayoría de los casos, el material cae por gravedad, pero, algunos materiales tienen pobres características de flujo y se precisan dispositivos adicionales para asegurar un flujo constante a la extrusora.

Las soluciones más usuales son montar la tolva sobre una plataforma vibradora o emplear un agitador dentro de la tolva para disgregar el material. Cuando el material es muy difícil de manejar, se emplean alimentadores de masa.





De manera muy general, podemos distinguir varios tipos de materiales que pueden presentar problemas de alimentación:

1.- Materiales con baja densidad de masa. La densidad de masa se calcula dividiendo el peso del material a alimentar por el volumen que ocupa. Para obtener un resultado correcto debe emplearse un recipiente mucho mayor que las dimensiones de las partículas. Si la densidad $\rho_m < 0{,}2$ g / cc, el material puede presentar pobres propiedades de flujo.

2.- Materiales con una alta compresibilidad por reordenamiento. Cuando se aplica presión sobre un material, este se compacta debido al reordenamiento de sus partículas. La separación entre el flujo libre y no libre se sitúa alrededor de un valor de la compresibilidad por reordenamiento (o compresibilidad) del 20 %. Estos suelen ser materiales con partículas muy irregulares.

Los indicadores mencionados son sólo aproximados y se emplean por su simplicidad. Un ensayo cualitativo sencillo para conocer la tendencia a empacarse de un material es el estrujón manual. El material se estruja entre las manos y se observa su comportamiento tras liberar la presión. Si el material ha formado una pelota maciza que no se disgrega con facilidad, el material es altamente compresible. Si sigue apelmazado pero se rompe con facilidad, el material es moderadamente compresible. Si no se apelmaza en absoluto, indica una baja compresibilidad y un material de flujo relativamente libre.

Los materiales con muy baja densidad de masa, tienden a atrapar el aire, que en algunos casos será transportado con el polímero y aparecerá por la salida dando defectos en el extrusión. Un método para evitar este problema es emplear una tolva de alimentación de vacío. Aunque en teoría parece sencillo, en la práctica resulta algo más complicado. La primera dificultad es llenar la tolva sin perder vacío. Se emplean sistemas de doble tolva de vacío, donde el material se carga en la tolva superior, y se hace vacío antes de pasarlo a la tolva principal. Un último método para evitar el





atrapamiento de aire es emplear una extrusora ventilada.

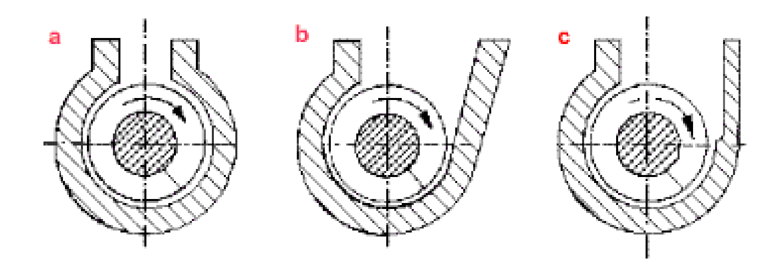




Garganta de alimentación y cilindro

El material de la tolva pasa al cilindro a través de la garganta de alimentación. La garganta es circular cuando la tolva también lo es.

El diámetro de la tolva es igual al del cilindro.

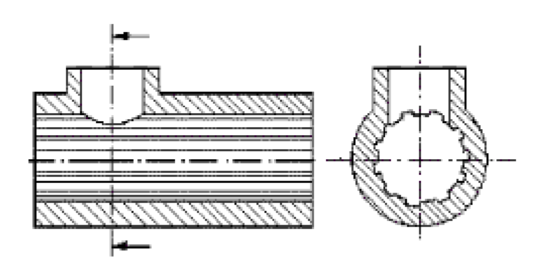


- El caso a) es la disposición estándar que se utiliza habitualmente.

- El caso b) mejora la mordida o arrastre del material cuando se trabaja con sólidos pulvurulentos. Otro tipo de alimentación puede crear problemas de flexión sobre la pared de la garganta.

- El caso c) puede ser apto para la carga de materiales suministrados en forma de banda o lámina.

Los materiales con bajo coeficiente de fricción, presentan una mala eficiencia de alimentación (el aumento de velocidad del husillo no da el aumento esperado en el caudal de salida).



La solución adoptada es emplear cilindros acanalados. El acanalado tiene como misión aumentar la mordida del husillo y aumentar la capacidad de plastificación en la sección de alimentación.

Las tensiones entre el polímero y los canales pueden ser muy altas, dando lugar a un alto desgaste, sobre todo si el polímero tiene componentes abrasivos (como fibra de vidrio). Por ello, se emplean materiales de alta resistencia a la abrasión.

El cilindro de la extrusora debe soportar presiones relativamente altas, del orden de 70 Mpa, y debe presentar buena rigidez estructural para minimizar su flexión (su único pie está situado bajo la tolva).

Los apoyos del cilindro han de estar colocados de forma que permitan la colocación de cabezales y boquillas muy pesadas, sin que el cilindro experimente una flexión excesiva.

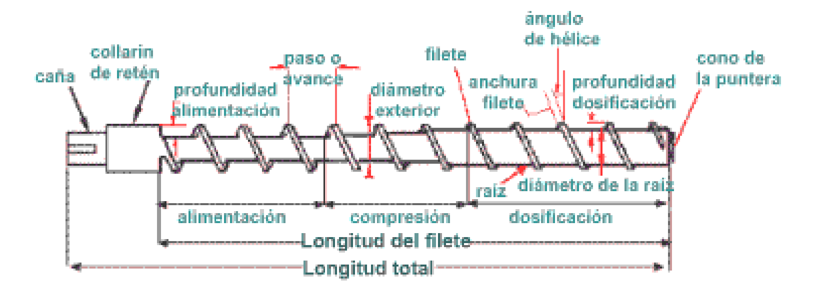
La mayoría de los cilindros se hacen con una superficie interior resistente a la abrasión. Las dos técnicas más comunes son nitrurado y aleaciones bimetálicas. Los ensayos comparativos indican que la resistencia al desgaste del recubrimiento bimetálico es superior, con una vida de 4 a 8 veces superior a la de los cilindros nitrurados.



Husillo o tornillo

Su rotación transporta el material. Es la principal contribución al calentamiento del fundido, y homogeneiza el material. En términos sencillos, se trata de un rodillo de diámetro variable con uno o varios filetes helicoidales a su alrededor. El diámetro exterior es constante en la mayoría de los diseños. La holgura entre el husillo y el cilindro es pequeña, alrededor de 0,001 D (de 0,0005 D a 0,002 D). El diseño del husillo es la clave para la buena marcha del proceso. La tabla muestra las propiedades físicas de los materiales más comúnmente empleados.

El husillo puede dividirse en 3 zonas:



- **Zona de alimentación**. Profundidad de canal grande y uniforme.
- **Zona de compresión**. Profundidad de canal disminuyendo progresivamente para cizallar el material plástico y ayudar a su fusión.
- **Zona de dosificación o bombeo**. Canal poco profundo y uniforme, que contiene ya el material homogéneamente fundido y alimenta el material a la boquilla de extrusión.

La longitud de cada una de estas tres zonas depende del tipo de material para el que se haya diseñado el husillo. En general, se considera bueno el diseño de un husillo cuando la granza que entra por la sección de alimentación se plastifica y forma una masa fundida homogénea antes de que ésta penetre en la zona de dosificación. El diseño universal tiene 10, 5 y 5 vueltas para cada una de las zonas mencionadas, pero la productividad será mayor empleando un husillo específico. Su capacidad de transporte (profundidad del canal) debe ser tal que suministre material plástico a las otras zonas sin que se note su falta (daría lugar a alimentación en oleadas).
En la zona de dosificación hay mucho cizallamiento y su longitud será tanto menor cuanto menor sea la estabilidad del polímero fundido, llegando a tener que suprimirse en el caso del PVC.

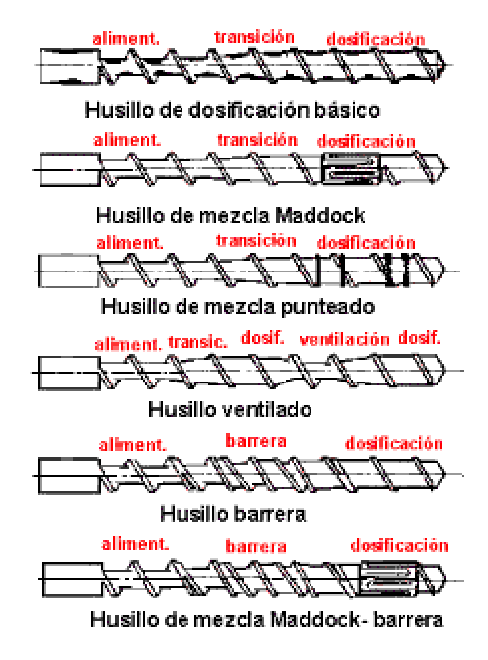


Hay distintos tipos de husillos. Su diseño depende de las funciones a las que se destinan.

- Tipos de husillos
- Diámetro y longitud del husillo

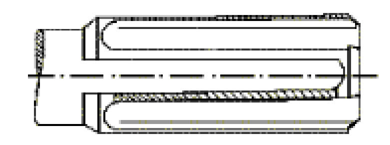


Tipos de husillos

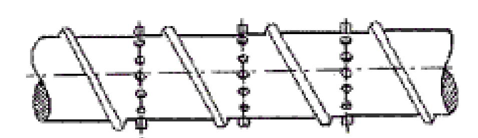


- **Husillo de dosificación básico**: Husillo simple sin ningún elemento adicional que ayude a la plastificación.

- **Husillo de mezcla Maddock:** Husillo que en la parte final cuenta con un elemento que cizalla y rompe el flujo laminar del polímero favoreciendo su fusión y mezclado.

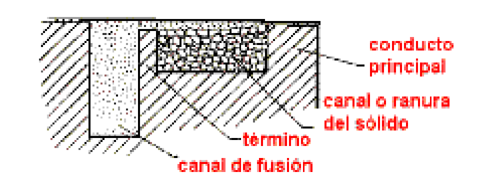


- **Husillo de mezcla punteado:** Husillo que sobre su superficie dispone de una serie de puntas que principalmente rompen el flujo laminar del polímero favoreciendo su fusión y mezclado.



- **Husillo ventilado:** Husillo con una zona intermedia de ventilado que permite la expulsión de gases al exterior del cilindro. En esta zona al entrar en contacto con la atmósfera a través de los orificios que presenta el cilindro, el polímero sufre una descompresión por lo que es necesaria una nueva compresión si se quiere garantizar un caudal de salida correcto.

- **Husillo barrera:** Husillo que cuenta con dos hélices con diferente paso. Una de las hélices comienza debajo de la tolva y es la que recoge la granza que cae desde la tolva. Esta hélice no llega hasta el final del husillo por lo que el polímero para salir de la extrusora debe pasar a la segunda hélice. Este paso es posible únicamente por encima del filete de la 1º hélice, por lo que regulando la holgura entre filete y cilindro puede ser evitado el paso de partículas infundidas y permitir exclusivamente el paso de polímero fundido.





Diámetro y longitud del husillo. Relación L / D

El diámetro y la longitud del husillo determinan el volumen de material con que se puede trabajar. En general, diámetros mayores y menores longitudes.

La relación L / D es una característica muy importante, ya que determina la cantidad relativa de superficie interna del cilindro de que se dispone para cizallar el material y para la transmisión de calor.En el diseño universal, L / D = 20, pero este valor puede llegar hasta 30 en otros diseños. Para el caso de extrusoras de doble husillo, L / D vale de 10 a 15. Para equipos con desgasificación L / D = 24 como mínimo.





Cabezal

En muchas extrusoras se coloca un plato rompedor entre el cilindro y el cabezal. Consiste en una placa de espesor 0,1 D con pequeños agujeros (diámetro de 3 a 5 mm) empacados. Los agujeros deben estar abocardados para evitar que se den zonas muertas en las que cese el flujo de material fundido, dando lugar a degradación y/o decoloración del mismo. La utilidad es detener el flujo en espiral de la masa polimérica, que podría extenderse hasta la salida de la boquilla. Otra razón es servir de soporte a las rejillas, generalmente de acero inoxidable. Las rejillas se emplean para filtrar los contaminantes del fundido, pero también pueden servir para obtener un fundido más homogéneo o para aumentar la capacidad de mezclado del husillo. En este caso, el empleo de una rejilla crea una mayor presión de retroceso, lo que conlleva un mayor cizallamiento del material por parte del husillo, por lo que éste transfiere más calor a la masa polimérica. La generación de calor dentro de la masa suele dar un fundido más homogéneo o un mejor mezclado que cuando el calor proviene de las paredes del cilindro.

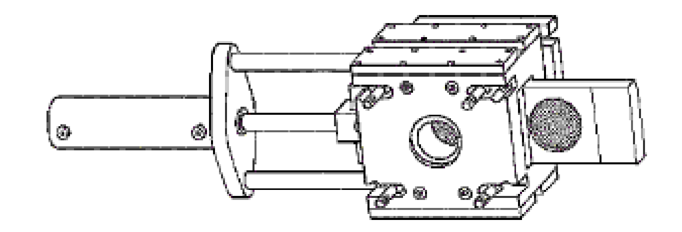
Se suelen colocar varias rejillas superpuestas, disminuyendo el tamaño de malla a medida que nos alejamos del plato rompedor. Un paquete típico serían 100 - 60 - 30 (los números, son números de mallas / pulgada cuadrada).

Hay tres tipos de filtros metálicos: malla de alambre, polvo sinterizado y fibra sinterizada. La malla de alambre puede estar tejida de dos maneras: malla cuadrada o cruzado holandés (tejido en líneas diagonales paralelas).

	Malla de alambre cuadrada	Malla de alambre. Cruzado holandés	Polvo sisterizado	Fibras metálicas
Retención de gel	Baja	Regular	Buena	Muy buena
Capacidad anticontaminante	Regular	Buena	Regular	Muy buena
Permeabilidad	Muy buena	Baja	Regular	Buena

Los geles suelen aparecer debido a la degradación del polímero o a consecuencia del aumento de mordida de la boquilla.

Para cambiar de manera frecuente las pantallas, se emplean cambiadores automáticos. En estos dispositivos se registra de manera continua la caída de presión a través de la pantalla. Cuando la caída de presión es superior a cierto valor, un pistón hidráulico desplaza el plato rompedor con sus pantallas usadas, reemplazándolo por un conjunto nuevo, sin necesidad de detener la extrusora.





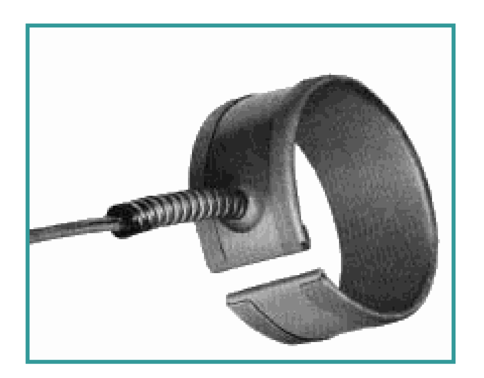
Sistemas de calentamiento

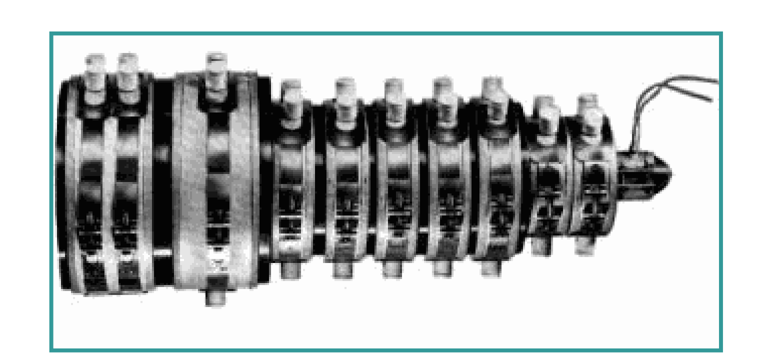
El cilindro se calienta mediante resistencias eléctricas. Las extrusoras pequeñas tienen de 2 a 4 zonas, y en las grandes hay de 5 a 10.

El calentador más usual consiste en un alambre resistente mediante tiras de mica, encapsulado en una cubierta de láminas de acero flexibles.

Un mal contacto da lugar al sobrecalentamiento de las resistencias eléctricas. Existen pastas comerciales especiales para mejorar la transferencia de calor entre el calentador y el cilindro.

Existen otros tipos de calentadores más fiables, pero más caros, como los cerámicos (mejor transmisión del calor) o los obtenidos mediante deposición del elemento calentador sobre bandas de aluminio o bronce y calentamiento por inducción.







Sistemas de enfriamiento

Un proceso de extrusión ideal es el autógeno o autotérmico. En este caso, todo el calor requerido se suministra por la conversión de energía mecánica en térmica. En la práctica, la extrusión no suele ser autógena, porque ello requeriría un delicado balance entre las propiedades del polímero, el diseño de la máquina y las condiciones de operación deseadas. Si nos acercamos demasiado a las condiciones del proceso autógeno, aumentará la necesidad de refrigeración, con el consiguiente derroche de energía. Si el husillo calienta poco el material, debe aportarse calor mediante los calentadores externos. Como el plástico es un aislante térmico, este es un proceso lento que requiere elevados gradientes de temperatura.
Así, el proceso es adecuado si el calor suministrado por el husillo está entre el 50 - 90 %, siendo idóneo si el intervalo es 70 - 80 %.

El sistema de enfriamiento más empleado es el de ventiladores de aire. Este sistema produce transferencias de calor relativamente pequeñas, por lo que cuando se pone en marcha el cambio de temperatura es suave y gradual.

Cuando se requiera un enfriamiento importante, se usa un líquido refrigerante, usualmente agua.

La refrigeración con agua puede hacerse de modo sencillo, sin uniones giratorias: se introduce un tubo de cobre por el agujero del husillo y se conecta a la fuente de agua. El agua saldrá por el espacio anular entre el husillo y el tubo, cayendo al llegar al final del husillo.



El enfriamiento del husillo puede usarse para aumentar la capacidad de generar presión del husillo.

La superficie del husillo está más fría y por ello, aumenta la viscosidad de la capa de polímero en contacto. Esto hace que la profundidad efectiva del canal reduzca. Además, puede aumentar la capacidad de generar presión de un husillo con profundidad de canal excesiva.

Cuando sea necesario aportar grandes cantidades de calor a la masa fundida, puede calentarse el husillo.



Son aquellas extrusoras que tienen dos husillos de igual longitud, ambos colocados en el interior del mismo cilindro o barril.

Los dobles husillos se pueden clasificar:

- Según la posición de los husillos en relación de uno con el otro en:
    - Husillos que no engranan.
    - Husillos que sí engranan.
- Teniendo en cuenta la forma y tamaño de las hélices:
    - Husillos no conjugados.
    - Husillos conjugados.
- Según el sentido de rotación de los husillos:
    - Husillos contrarrotatorios
    - Husillos corrotatorios





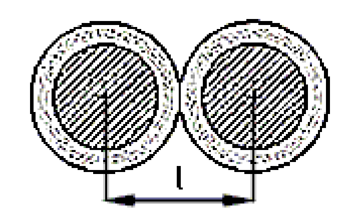
Según la posición de los husillos:

Husillos que no engranan

- Los husillos están colocados uno al lado del otro, pero las hélices de uno no penetran en los canales del otro.

- La distancia entre los centros es igual a la suma de los radios.

- Operan de manera muy similar a los extrusores monohusillo (el principal factor es la fricción entre polímero y la superficie de metal).

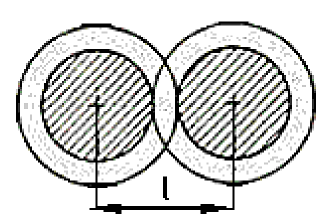


Husillos que sí engranan

- Los husillos están colocados uno al lado del otro y las hélices de uno penetran en los canales del otro.

- La distancia entre los centros es menor a la suma de los radios.

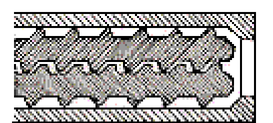
- Operan de manera diferente a los extrusores monohusillo.



Teniendo en cuenta la forma y tamaño de las hélices:

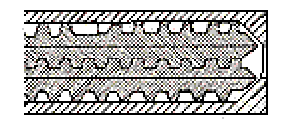
Husillos no conjugados:

- Las hélices de un husillo ajustan en los canales del otro y dejan una amplia holgura.



Husillos conjugados:

- Las hélices de un husillo ajustan perfectamente en los canales del otro y dejan una mínima holgura.

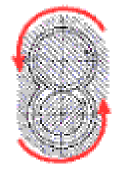


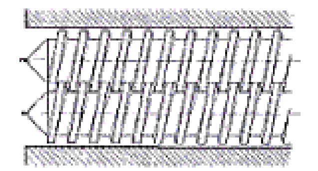


Según el sentido de rotación de los husillos

Husillos corrotatorios:

Los dos husillos giran en el mismo sentido.





Husillos contrarrotatorios:

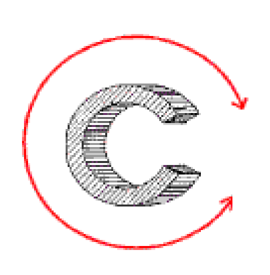
Los dos husillos giran en sentido opuesto.





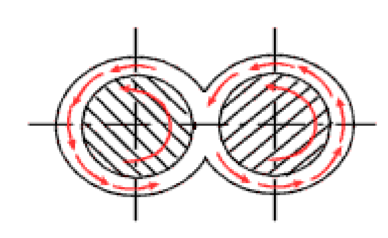
Husillos contrarrotatorios conjugados engranados

- El material permanece encerrado en cámaras en forma de C.
- El transporte de material se realiza en conjunto todo el bloque C, por lo que:
  - Disminuye la fricción.
  - Disminuye el mezclado.
  - Disminuye la posibilidad de degradación por cizalla.
  - La mayoría del calor es aportado por las bandas calefactoras, favorecido por una baja profundidad de canal.
  - Se utiliza principalmente para extruir PVC (sensible a la degradación térmica) por que las bandas calefactoras permiten controlar más precisamente y aportar más gradualmente el calor necesario para fundir el polímero.





Husillos corrotatorios conjugados engranados



- El polímero fundido se transfiere de un husillo a otro (describe una especie de 8).
- La fricción y el calor recibido por las bandas calefactoras son altos debido al mayor recorrido del polímero.
- El mezclado es alto en la zona de engrane de los dos husillos.
- Se utiliza para mezclado por extrusión (compounding), normalmente los husillos autolimpiantes que por su forma especial consiguen que el material existente en las paredes del canal también se desplace.

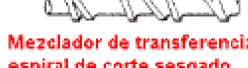
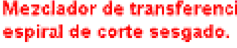




Mezclado por extrusión (Compounding)

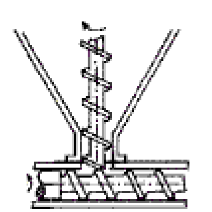
Esta operación consiste en el mezclado del material crudo (normalmente en forma de polvo) con varios aditivos (antioxidantes, estabilizantes, plastificantes, fibras, cargas y pigmentos). Es en muchas ocasiones el paso final empleado las empresas suministadoras de material para obtener el material con las prestaciones deseadas. Puede hacerse en extrusoras de un husillo con zonas de mezclado especiales, pero a nivel industrial se usa sobre todo extrusión de doble husillo con husillos engranados conjugados corrotantes autolimpiantes (citados en el punto anterior).

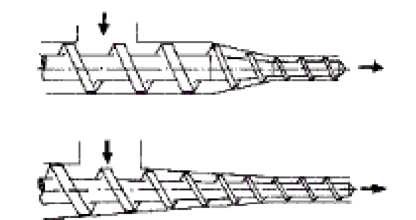
Ejemplos de husillos con zonas de mezclado:



En todos los casos se pretende restringir el flujo del polímero para crear turbulencias, cizallamiento o barrera que favorezcan la fusión, mezclado del polímero y eviten el paso de partículas infundidas.





Una de las dificultades es la alimentación de la extrusora. El polvo tiende a apelmazarse en la tolva. En otros casos, son mordidos de manera irregular por el husillo, dando un caudal de salida irregular. Estos problemas se superan con técnicas especiales de alimentación. Se emplean dispositivos especiales de alimentación, como los alimentadores de husillo, que fuerzan al material a pasar a través de la garganta de alimentación. También se emplean vibradores unidos a la tolva de alimentación.

Se procesa a altas velocidades, de entre 5 y 50 kg / min. Las extrusoras son grandes, y también lo es el equipamiento adicional. Las extrusoras de doble husillo son las más empleadas por ofrecer varias ventajas:



- La alimentación se favorece respecto a las de un husillo (mayor diámetro de la garganta de alimentación).
- El mezclado es mejor debido a que el flujo de material se rompe continuamente en la zona entre husillos.
- En muchos casos, los husillos son autolimpiantes. Este hecho, hace que las distribuciones de tiempos de residencia sean muy estrechas, por lo que se pueden purgar y cambiar de material o color de manera rápida y eficiente.





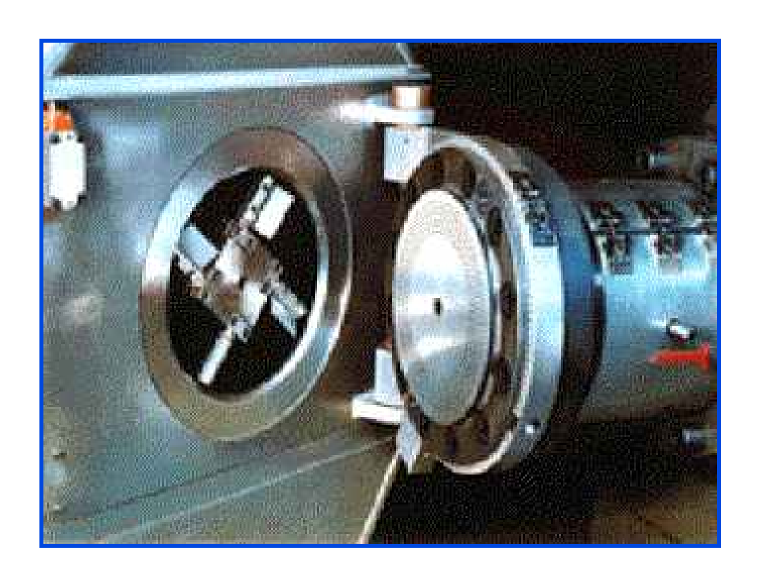
Algunas de estas máquinas se diseñan para ejercer baja cizalla sobre el material. El mezclado se da en la zona entre los husillos por agitación. El bajo cizallamiento produce una menor transferencia de energía mecánica a la resina y evita la descomposición de materiales sensibles al cizallamiento (como el PVC).

Generalmente, se trabaja con boquillas con varios agujeros. Los agujeros se sitúan en forma circular en la boquilla, equidistantes del centro, para dar el mismo caudal. Existen dos tipos de operaciones:

1.- Extrusión de hebra y granzado. La boquilla, situada a unos 5 ó 10 cm del baño de agua, produce hebras que pasan por un baño de agua. Cada agujero tiene un diámetro de unos 5 mm y produce una hebra de unos 3 mm de diámetro (estiraje), con un caudal de ½ kg / min, aprox.. A la salida, el agua se elimina mediante soplado de aire. Las hebras son arrastradas por una cinta o por unos rodillos, a la salida de los cuales son cortadas por un cortador. Este proceso puede generar una granza con lentejas defectuosas (largas) por un mal corte debido a que el polímero se encuentra sólido, que pueden dar problemas de alimentación.

2.- El granzado submarino, la boquilla está sumergida en un baño de agua. Las hebras son cortadas en la superficie misma de la boquilla, y son arrastradas por la corriente de agua. Se recogen en una pantalla transportadora, donde se elimina el agua mediante soplado. Esta técnica da un granulado casi esférico, más homogéneo en cuanto a tamaños, y se emplea para evitar las complicaciones de tener que trabajar con muchas hebras. Se emplea, pues, en extrusoras grandes con muchos agujeros y con altos caudales.





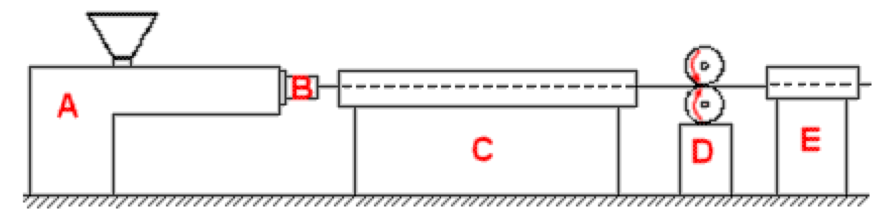
En ambos procedimientos, las lentejas pueden ser secadas, mezcladas o recubiertas con aditivos antes de embalarlas.



Extrusión de tubos y mangueras

Las mangueras suelen tener un diámetro de hasta 20 mm, y en los tubos el diámetro es mayor.

En una instalación típica de extrusión de tuberías, además de la extrusora son necesarios los elementos siguientes: cabezal - boquilla, mecanismo de calibración, baño de enfriamiento, mecanismo de arrastre y cortadora y/o enrolladora. Normalmente, cada extrusora extruye un solo tubo, y su tamaño depende del diámetro del tubo. La siguiente figura muestra una instalación típica de extrusión de tubos.



A) Inyectora; B) Cabezal-boquilla; C) Calibrador y baño de enfriamiento; D) mecanismo de arrastre; E) Cortadora o bobinadora.

Son corrientes tuberías de 30 a 100 mm de diámetro exterior, si bien se extruyen también tuberías de hasta 1.000 mm. La capacidad de enfriamiento de la línea (su longitud) debe estar acorde con la producción y la naturaleza del material. Así, las líneas de enfriamiento de LDPE (cristalino) pueden ser el doble de largas que las de PVC (amorfo).

Al hablar de la extrusión de tubos y mangueras, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Materiales plásticos usados para tuberías
- Tipos de cabezal-boquilla
- Calibrado
- Condiciones de proceso
- Baño de refrigeración



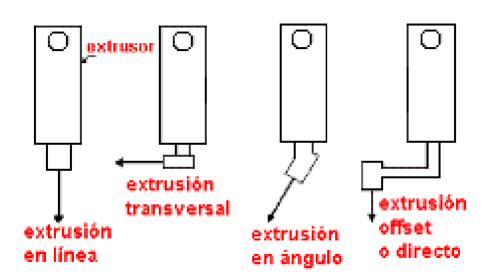


Materiales plásticos usados para tuberías

La siguiente tabla recoge los materiales plásticos usados para tuberías:

Campo de aplicación	Materiales	Propiedades
Uso general y aplicaciones sin presión	UPVC, PP, LDPE y ABS	
Tuberías a presión para conducción de agua y gas	HDPE, PP	Buena resistencia a la ruptura por fluencia y bajo coste
Aplicaciones a presión y a elevada temperatura (calefacción central doméstica)	PB, XLPE, CPVC, PP	Resistencia a la fluencia a mayores temperaturas
Tubos de pequeño diámetro	Diversos, principalmente PVC, poliolefinas (PP y PE) y nylon	

Tipos de cabezal - boquilla

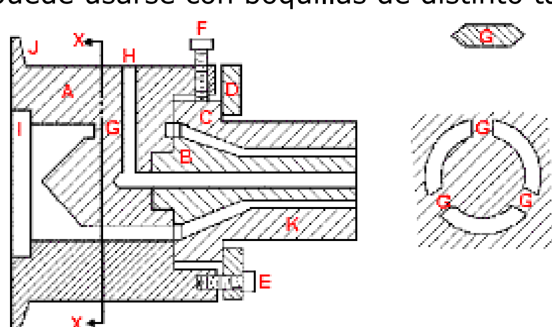


Los cabezales pueden ser de cuatro tipos: directo, en ángulo (45 ó 60º), transversal y en línea.

De entre ellos, el más utilizado actualmente es el cabezal directo. Es el más sencillo, tiene menores tiempos de residencia y menor camino de flujo, dando un mejor control del fundido y tubos de mayor calidad.

La extrusión de tubos implica pasar de una corriente de fundido circular a la salida de la extrusora a una corriente anular a la salida de la boquilla.

En la figura se muestra un diseño de cabezal - boquilla para procesar UPVC.
Un cabezal puede usarse con boquillas de distinto tamaño.



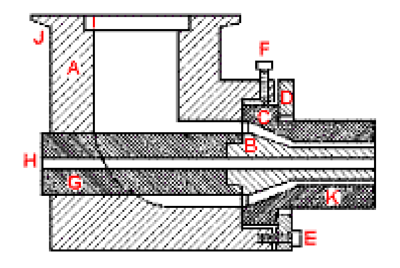
A) Cabezal, B) mandril, macho de la boquilla, C) hembra de la boquilla, D) Anillo de contención de la boquilla, E) Tornillos de contención de la boquilla, F) Tornillos de centraje de la boquilla, G) pata de araña, H) agujero para el aire, I) asiento para el plato rompedor, J) anillo de anclaje a la extrusora, K) zona paralela.

El mandril está sujeto por el cabezal y en él los flujos se juntan para dar una única corriente tubular. El fundido tiene tres líneas de soldadura, por lo que, para que sean resistentes, el tiempo de residencia en la zona cónica de la boquilla debe ser varias veces el tiempo de relajación del polímero. Se ha probado que cuando un polímero pasa por una zona de compresión (sección del canal decreciente), las moléculas del polímero se estiran en la dirección axial y esta deformación disminuye de manera importante el tiempo de relajación. De este modo, se obtienen buenas líneas de soldadura en cortos tiempos de residencia.

Es importante que la parte hembra de la boquilla esté centrada sobre el mandril, para conseguir una sección de pieza regular. Para ello se centra con los tornillos de empuje (F). El centrado fino se efectúa con el proceso en marcha, hasta conseguir que el extruido salga recto. Si sale y se desvía, deben apretarse los tornillos que apuntan en la dirección hacia la que se desvía el extruido (cuando una sección es más gruesa, opone menos resistencia al paso y sale más material; el extruido se dobla en la dirección de las secciones más delgadas). Los tornillos (E) aprietan mediante el anillo de retención (D) la boquilla sobre el cabezal. El agujero (H) está abierto a la atmósfera para permitir que el tubo se llene de aire a medida que sale de la máquina y asistir al calibrado del tubo.

En el caso de las poliolefinas se prefiere sujetar el mandril al cabezal mediante un anillo perforado, en lugar de las patas de araña, puesto que se prefiere un mayor número de líneas de soldadura resistentes a un menor número de líneas más débiles.

La figura muestra el esquema de un diseño de boquilla para extrusión transversal.



A) Cabezal, B) mandril, macho de la boquilla, C) hembra de la boquilla, D) Anillo de contención de la boquilla, E) Tornillos de contención de la boquilla, F) Tornillos de centraje de la boquilla, G) soporte del mandril, H) agujero para el aire, I) asiento para el plato rompedor, J) anillo de anclaje a la extrusora, K) zona paralela.

En este diseño no existe una araña, pero el fundido debe bordear el soporte de mandril, existiendo una línea de soldadura donde los flujos se reúnen.

Calibrado

A la salida del cabezal, el fundido se hincha, por lo que las dimensiones del tubo obtenido son mayores que las de la región anular en la boquilla. Para obtener un tubo con un buen acabado y dentro de las tolerancias requeridas es necesario proceder al calibrado. Existen distintas técnicas:

- Extrusión libre
- Tubo de calibración externa
- Placas de calibración
- Mandrino interno prolongado
- Modernos sistemas de control de proceso





Extrusión libre

La fabricación de tubos y mangueras ocupa un puesto destacado dentro de los procesos de extrusión. El mayor mercado en cuanto a cantidad de materia prima consumida es el de la fabricación de tuberías de UPVC para drenaje o desagüe, sin embargo se utilizan el HDPE y el MDPE para la fabricación de tuberías para la conducción de gas. Otro tipo de tubos más pequeños y flexibles son producidos en LDPE o en PA. También tiene una gran importancia la fabricación de tubos y mangueras corrugadas (macarrón) o no para el sector eléctrico. Cuando se trabaja con UPVC ha menudo se utilizan extrusoras de doble husillo mientras que con los demás materiales se trabaja con extrusoras monohusillo.

Es la técnica más sencilla (sin sistema de calibrado). Puede funcionar con pequeñas mangueras, pero controlar el diámetro y redondez se hace complicado a medida que aumenta su diámetro.





Tubo de calibración externa (con vacío o presión)

El diámetro exterior del tubo extruido queda bien determinado por contacto con un tubo metálico. Este contacto se logra aplicando en el interior del tubo extruido una presión superior a la exterior, bien mediante vacío exterior (el interior se deja abierto a la atmósfera) o bien mediante presión interior (el exterior se deja abierto a la atmósfera). El método de vacío es más sencillo de controlar, siendo el más usado. El tubo calibrador suele tener unas dimensiones ligeramente superiores para compensar la contracción (3 % para PE, por ejemplo), se fabrica de un material no corrosivo, siendo satisfactorio el bronce. Suele ser de unos 20 a 45 cm de longitud. Una superficie interior lisa ocasiona adherencia, y un acabado liso satinado es lo adecuado para producir un tubo satisfactorio.



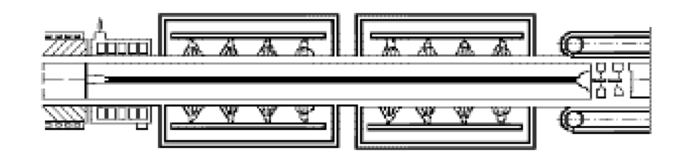
Un vacío de sólo 0,1 o 0,2 bares puede bastar para tubos pequeños y medianos; diferencias de presión mayores pueden perjudicar las propiedades mecánicas del tubo.

Un enfriamiento homogéneo en esta etapa es fundamental para evitar la falta de redondez y el arqueado del tubo, por lo que debe estar totalmente sumergido en el agua.

Cuando se calibra mediante presión, el aire a presión puede conectarse con el interior del tubo extruido a través de un brazo de la araña (boquillas directas) o por la parte posterior del mandril, mientras que el exterior está abierto a la atmósfera, la diferencia de presiones entre el interior y el exterior debe ser pequeña. Para que el aire no se pierda por el extremo del tubo que se está extruyendo, se hace uso de varias técnicas:

- En tuberías de poco diámetro, se suele cerrar el tubo por aplastamiento del extremo.

- En tuberías grandes, que se cortan en ciertas longitudes, se coloca un tapón interno en el extremo de la boquilla mediante una cuerda de hasta unos 3,0 metros de longitud. El tapón es de cuero u otro material blando que permite que la tubería se deslice sobre él mientras que casi todo el aire permanece dentro de la tubería. Una mejora consiste en emplear un fuerte electroimán.



Bien a vacío o con presión, se consideran las siguientes normas generales de diseño:

  - Las dimensiones interiores del tubo calibrador deben ser algo mayores que el diámetro exterior del tubo deseado, para compensar la contracción (p.e. 3 % para el LDPE).

  - Los polímeros se hinchan a la salida de la boquilla. Para minimizar el cambio en la dirección de flujo, el diámetro de la boquilla es ~10 % inferior al del calibrador.

- En la extrusión de tubos, la relación (sección boquilla)/(sección manguera) o estiraje es mínimo (entre 1,1 y 1,2). En caso contrario, la resistencia a la presión en el sentido transversal queda disminuida como consecuencia de la orientación provocada por el estiramiento. Por ello, la sección de la boquilla es sólo un 5 ó un 10 % inferior a la del tubo a producir.

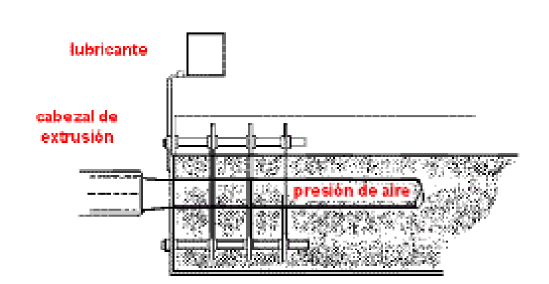


Respecto a las mangueras, los valores frecuentes de estiraje están entre 2 y 6, por lo que la sección de la sección de la boquilla es mayor que la del tubo a extruir. De esta forma, se trabaja contra una resistencia menor, y la velocidad de producción es mayor. Las mangueras no suelen tener altos requerimientos en cuanto a control dimensional, por lo que el tubo calibrador es del tamaño de la manguera a extruir. Las mangueras se extruyen a velocidades de 50 a 100 m / min.

Placas de calibración

Puede resultar ventajoso para la extrusión de mangueras de menor diámetro (ø < 20 mm). Estos tubos, sobre todo cuando se extruyen en máquinas de tamaño medio, alcanzan velocidades lineales muy altas, que superan el límite de adherencia al pasar por el tubo dimensionador y pueden dar problemas de adherencia. Este problema no aparece con las placas de calibración, por lo que puede usarse la producción total de la máquina. La tubería toma su tamaño haciéndola pasar a través de una serie de placas de latón o de acero inoxidable de 3 - 5 mm de espesor (normalmente 5). La primera placa tiene un orificio entre 10 y 15 % más pequeño que la tubería que entra. Esta primera placa puede ser la entrada a un baño de agua o una o varias de estas placas se instalan dentro de un baño de refrigeración, en cuyo caso se deja caer agua en cascada alrededor de la tubería entre estas placas y la entrada del baño.

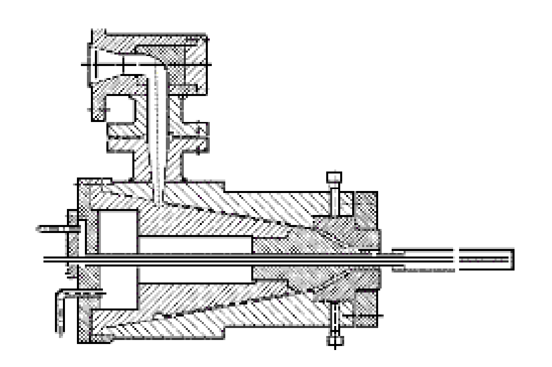
Las placas tienen la entrada en los orificios biselada a 45º. El tamaño de los orificios de las placas de calibración sucesivas es progresivamente menor, a medida que la tubería se enfría y contrae; la placa final tiene un diámetro aproximadamente 0,25 mm mayor que el diámetro exterior de la tubería final. A mayor velocidad o con HDPE hay que emplear más placas.





Mandrino interno prolongado

Con el objeto de lograr un enfriamiento más rápido del tubo, se utiliza el calibrado interno con mandril prolongado para procesar LDPE. Este método aporta sobre todo enfriamiento adicional. Por lo que, si la velocidad de enfriamiento limita la velocidad de extrusión, se podrá procesar a mayor velocidad (hay que recordar que el LDPE precisa una línea de enfriamiento el doble de larga que los termoplásticos amorfos.)



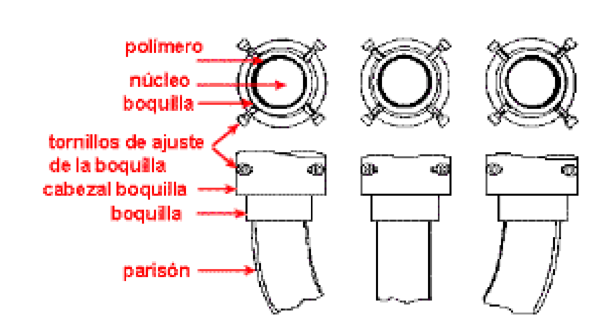
Debido a que el mandril prolongado está refrigerado, debe estar bien aislado del resto de la boquilla. Este problema de aislamiento fue la razón de usar la boquilla en línea, ya que en la boquilla directa el agua ha de pasar a través de uno o todos los brazos de araña, enfriándola y originando líneas de soldadura de los flujos muy débiles.

Diseños posteriores permitieron aislar el paso del agua de refrigeración del mandril mediante los plásticos fluorados, haciendo posible el uso de cabezal-boquilla directos con mandril prolongado, que fue una solución más adecuada.

Modernos sistemas de control de proceso

Actualmente es posible la medida (normalmente mediante ultrasonidos) del diámetro del tubo a lo largo del perímetro, lo que se emplea para corregir el centrado de la boquilla. En realidad, la boquilla no se centra geométricamente, sino que se desplaza para corregir las anomalías inducidas en el espesor del tubo por, por ejemplo, fluctuaciones de temperatura, diferentes caídas de presión, etc.

Esta operación se acometía inicialmente mediante sistemas mecánicos. Más recientemente, los sistemas de centrado térmico, con boquillas con distintas zonas en la dirección circunferencial aisladas entre sí y controladas separadamente, pueden variar localmente la temperatura del fundido, y por tanto la velocidad del flujo en esa región y su espesor.





Condiciones de proceso

Los tubos se procesan con un estiraje muy pequeño (de 1,1 a 1,2) y las velocidades típicas de proceso son de 5 a 15 m / min. Las temperaturas son las mínimas que permitan el procesado, ya que al ser piezas de elevado grosor, la extracción de calor es lenta y la velocidad de enfriamiento puede llegar a ser una limitación. Así, la fabricación de tuberías y filmes tubulares son los procesos de extrusión en que se emplean menores temperaturas.
Esto supone también menos temperatura en boquilla, lo cual ayuda a una calibración más exacta. Son temperaturas típicas: 140 - 150 ºC para LDPE y 200 - 220 ºC para HDPE.



En la extrusión de mangueras es preciso emplear mayores temperaturas de fundido para que el estiraje no de lugar a la rotura de la superficie (superficies rugosas) y el material pueda relajar la orientación inducida durante el estiraje.

Baño de refrigeración

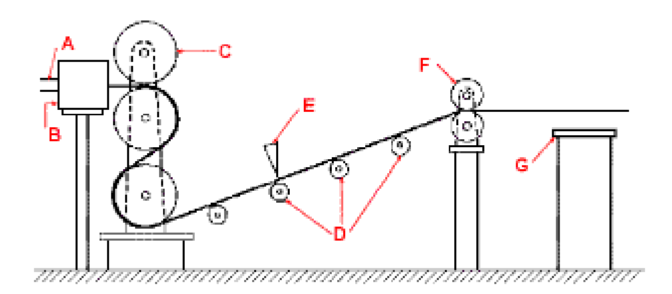
Los materiales cristalinos (poliolefinas por ejemplo) son difíciles de enfriar ya que hay que eliminar mucho calor. Por esta razón siempre se usan baños de agua sea cual sea el sistema de calibrado, en general son dos veces más largos que en el caso de otros plásticos (PVC o ABS). Por ejemplo, entre 6 y 12 metros de longitud.


Bañeras de refrigeración



Extrusión de Planchas

Los polímeros no son productos naturales. Los procesos por los que se crean los polímeros se conocen con el nombre de síntesis.



A) entrada a la boquilla, B) boquilla, C) acabador de tres rodillos, D) rodillos de soporte, E) cortador-embellecedor del borde, F) rodillos de empuje, G) sierra de corte. La boquilla (B) suele ser muy pesada, por lo que usualmente lleva un soporte.

La parte esencial del proceso son los tres rodillos de acabado (C). Suelen tener diámetros ente 25 y 40 cm, estando pulidos y cromados. Los tres giran a igual velocidad, pero cada uno tiene su propia temperatura de agua de refrigeración (que sale y entra mediante juntas exteriores) y por consiguiente su propia bomba de agua. La posición del rodillo intermedio es fija, pero el superior e inferior pueden desplazarse unos cm hacia arriba o abajo mediante pistones. La función del rodillo superior es únicamente pinzar la lamina, por lo que muchas veces es más pequeño para reducir su coste. El rodillo intermedio enfría una de las caras de la hoja, mientras la otra está en contacto con el aire. El rodillo inferior enfría la otra cara.

La distancia entre los rodillos de acabado y los de arrastre es de varios metros. La plancha va sobre cilindros refrigerados, que siguen enfriándola. Los rodillos de arrastre están cubiertos por goma, y normalmente giran a una velocidad ligeramente superior a la de los rodillos de acabado. Ello mantiene un buen contacto entre la lámina y los rodillos de acabado. En los equipos modernos, ambas velocidades están interconectadas eléctricamente, manteniendo una diferencia de velocidad programada de manera automática.

La separación boquilla - rodillos es bastante larga, de modo que la hoja se comba en este espacio. Su viscosidad debe ser suficientemente alta como para que no combe demasiado. En algunos casos, se prefiere dirigir la hoja hacia abajo, donde es mordida por los cilindros. Las temperaturas de procesado son las más bajas factibles (unos 175 ºC para el PE), puesto que el enfriamiento es la limitación más importante.

Al hablar de la extrusión de planchas, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Materiales plásticos para planchas
- Boquillas
- Sistema de arrastre
- Técnicas especiales
- Coextrusión



Máquina de laminado
Irudi hau ondo da hamen?



Materiales plásticos para planchas

Los materiales más frecuentemente extruidos son el UPVC, ABS y PS. Se usan también poliolefinas, estireno - butadieno, celulósicos, acrílicas, etc.

Se distingue entre filme (lámina, película) y plancha (placa, hoja) por sus espesores. En general espesores inferiores a 0,25 mm se denominan filmes, láminas o películas y los superiores a este valor se denominan planchas u hojas.

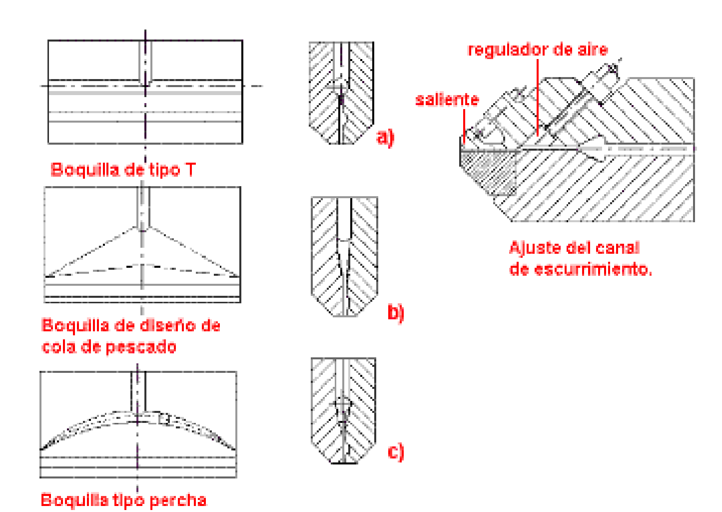


Planchas de PVC-PP y PE



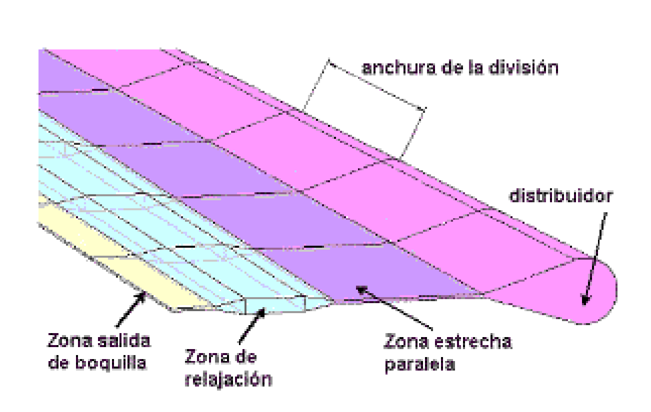
Boquillas

Existen tres diseños distintos de boquilla en el mercado:



La más sencilla es la boquilla de tipo T. En este diseño, el fundido proveniente de la extrusora se distribuye a lo largo de la anchura de la boquilla a través de un distribuidor cuyas dimensiones son considerablemente mayores que el espesor del canal de salida. Esta boquilla no garantiza la salida una distribución de flujo uniforme, puesto que la resistencia varía con la posición.

En la práctica, este diseño sólo puede funcionar de manera aceptable con materiales de baja viscosidad.



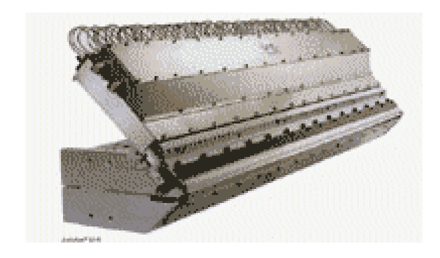
Los diseños en cola de pescado y tipo percha son soluciones reológicamente estudiadas para asegurar una distribución de flujo homogénea, esto es, velocidad media de salida uniforme a lo largo de la anchura del extruido. En estos diseños, la sección del distribuidor y la longitud de la zona paralela disminuyen según nos alejamos de la entrada a la boquilla. Así, un elemento de fluido cerca del centro de la boquilla pasa poco tiempo en el distribuidor, pero tendrá que superar una larga y estrecha zona paralela. En el caso de los elementos de fundido extruidos por los laterales, el tiempo de residencia es alto en el distribuidor y bajo en la zona paralela. Con estos diseños se fabrican planchas de entre 1 y 2 m de anchura.

La uniformidad y constancia de la temperatura y viscosidad del fundido en la entrada de la boquilla son fundamentales para una buena distribución del fundido. De no ser así, el fundido se repartirá en la boquilla de manera distinta de acuerdo con la distribución espacial de temperaturas (y viscosidades).

Además del problema de la distribución uniforme del fundido a lo largo de la boquilla, se presenta el problema de la rigidez mecánica de la boquilla. Las dos mitades de la boquilla están ancladas por los extremos, y dada su anchura y las altas presiones en el interior, la parte central tiende a flexar, dando un mayor paso de fundido. Este efecto se conoce como "clamshelling" ("formación de concha de almeja"). Una deflexión de tan sólo 0,1 mm en cada labio de la boquilla supone una variación en el espesor de la plancha extruida del orden de un 20 %. Este defecto puede corregirse mediante el ajuste de los labios de la boquilla. Sin embargo, ello afecta la distribución de presiones dentro de la boquilla y por tanto la distribución del flujo.



Para conseguir una hoja de espesor uniforme nos veremos obligados a cerrar los labios y ello reduce el caudal de material, por lo que la boquilla debe estar diseñada para una mínima deflexión. Existen sistemas que controlan y corrigen de manera automática el perfil de la lámina mediante el ajuste de los labios de la boquilla.



Sistema de arrastre

Es muy importante el control de la temperatura de los cilindros para obtener la mejor superficie posible. Esto es especialmente verdad con el PE con el que sólo una variación de unos pocos grados transforma una hoja de brillo suave en otra rugosa. El PE, por ejemplo, debe estar bien fundido y transparente sobre el primer cilindro, cristalizando en el mismo momento que lo abandona. Si en el último cilindro está demasiado caliente puede ocurrir alabeo de la plancha.

En general la orientación del material es indeseable ya que se hace una dirección más fuerte a expensas de la otra; se evita la orientación elevando la temperatura del compuesto, bajando la tensión entre los cilindros de refrigeración, y bajando el grado de estiramiento (relación entre abertura de la boquilla y espesor final deseado).
La hoja se somete a cierto estiramiento, lo que da lugar a una reducción mucho más importante en espesor que en anchura, y compensa en alguna medida las variaciones en espesor e hinchamiento en la boquilla (debidas a distintas historias de cizalla). Casi todo el hinchamiento en anchura se da en los bordes, por lo que tienen forma de bulbo, más gruesos que el resto de la hoja, por lo que son frecuentemente cortados. El empleo de rodillos de mayor anchura que la hoja puede reducir la cantidad de material a cortar. La necesidad de cortar los bordes hace que la cantidad de material para recuperar sea importante (15 % o más).

En hojas delgadas se enfría mediante aire sobre la cara superior mientras la hoja es portada por una oruga. En hojas más gruesas, se emplea aire por ambas caras mientras la hoja es portada sobre rodillos. También se puede enfriar en baño de agua o pasando entre tambores refrigerados por agua. Estos pueden estar pulidos, texturizados o estampados para dar el consiguiente acabado. También pueden estar perfilados u ondulados para dar un corrugado lineal o lateral.





Técnicas especiales

Extrusión y conformado en continuo

Existen máquinas que pueden recibir una hoja caliente que se está extruyendo y moldear con ella piezas acabadas en continuo. Una máquina rotativa es más simple, pero lleva consigo el uso de moldes múltiples y queda restringido su uso a la fabricación de productos pequeños y poco complicados.

Hojas gruesas

En general no es corriente obtener hojas de más de 3 - 4 mm de espesor; hojas entre 4 y 6 mm se pueden fabricar con equipos corrientes con tal de que el equipo de arrastre se mueva suficientemente lento. La boquilla se debe construir de modo que se llene totalmente a pesar de la gran separación de los labios de la misma. La obtención de hojas de más de 6 - 7 mm presenta serios problemas.

Eliminación de cargas estáticas

Cuando la hoja extruida pasa por el mecanismo de arrastre suelen acumularse cargas eléctricas sobre ella. Dichas cargas atraen el polvo del ambiente, lo que empobrece el aspecto de la hoja. Puede pasarse la hoja por un ionizador de aire, o a través de un baño de detergente que forma una película que disipa las cargas. En ocasiones se añade a las formulaciones agentes antiestáticos.

Coextrusion

Las ventajas de la coextrusión son mejor unión entre las capas, menores costes de materiales y procesado, y hojas de mayor calidad, con tendencia reducida a los "ojos de aguja", delaminación y atrapamiento de aire entre las capas. Por ejemplo, la coextrusión ABS / PS se usa en revestimiento de puertas de neveras y envasado de margarinas. El ABS da resistencia química y el PS abarata costes. Existen básicamente tres técnicas diferentes de coextrusión:

- Cabezales con bloque alimentador y un sólo distribuidor
- Cabezales multidistribuidores
- Coextrusión de múltiples labios
- Cabezal combinado bloque alimentador / distribuidor múltiple

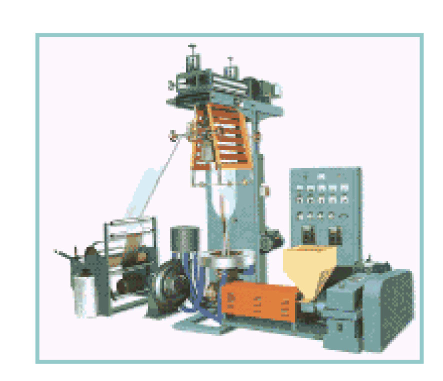




Extrusión de Film

La mayor parte del film producido se utiliza en embalaje aunque también tiene aplicación en otros sectores tales como el agrícola (film de PE para invernaderos, film para embalar forraje, sacos de fertilizante, etc.) y el de la construcción (membranas impermeables, film de protección frente a la lluvia, etc.).

Hay dos técnicas básicas para obtener filmes: el proceso de extrusión soplado (extrusión tubular) y el proceso de colada (extrusión de film plano).



- Extrusión de film tubular
- Extrusión de film plano

Estudiaremos la relación que existe entre estas dos técnicas:

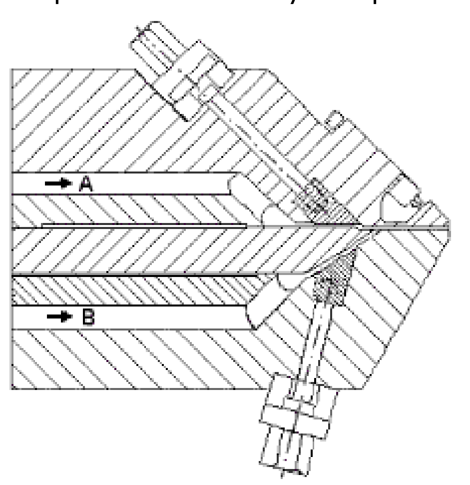
- Relaciones entre filmes tubular y plano
- Ventajas y desventajas de los distintos métodos

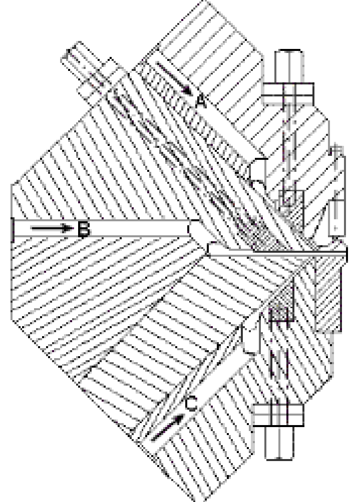


La dependencia de la viscosidad con la velocidad de cizalla dificulta el control del proceso. Un polímero de menor viscosidad tiende a migrar hacia la pared, donde la velocidad de cizalla es mayor, lo que disminuye aún más su viscosidad.

Cabezales multidistribuidores

En esta técnica se emplea un distribuidor para cada corriente de fundido. Cada distribuidor se diseña para distribuir la capa del propio polímero de manera uniforme antes de encontrarse con las otras capas. Las diferentes corrientes de fundido entran separadamente y se juntan dentro de la zona paralela de la boquilla. La ventaja de este sistema es que polímeros con grandes diferencias en las propiedades de flujo pueden combinarse con distorsión interfacial mínima. Se controla el espesor de las capas individuales mediante una barra obturadora, mientras que el espesor de la hoja final puede ajustarse mediante el labio flexible. Las desventajas son un diseño complejo de la boquilla, alto coste y número limitado de capas que pueden combinarse. Las figuras muestran diseños de boquilla para coextruir 2 y 3 capas.



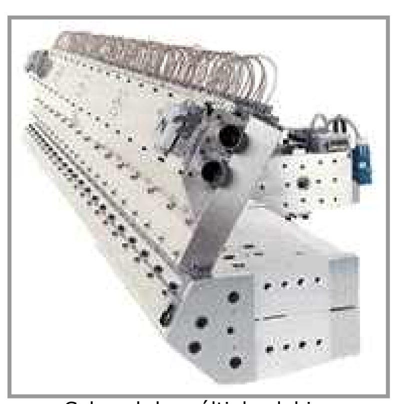


Coextrusión de múltiples labios

Tal y como se ha indicado, la construcción de boquillas multidistribuidoras de más de tres distribuidores es compleja.

Si estos tres distribuidores no resultan suficientes para obtener la hoja deseada, se pueden emplear varias boquillas multidistribuidoras. Hay distintos labios a través de los cuales salen distintas hojas que se combinan nada más salir mientras están aún fundidos. Para adherir las hojas se emplean rodillos de presión.

Esta técnica es más cara que la del bloque alimentador, pero permite controlar el espesor de las capas individuales, se eliminan los ojos de aguja (agujeros diminutos en el film) y el arranque es más sencillo.



Cabezal de múltiples labios



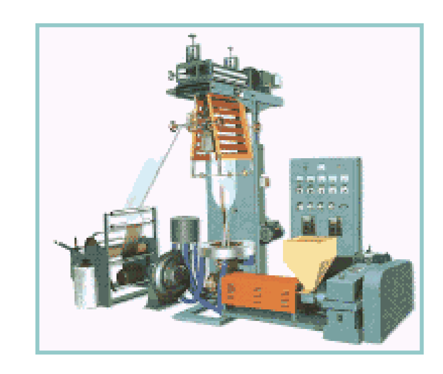
Cabezal combinado bloque alimentador / distribuidor múltiple

Mas que una técnica distinta, se trata de una combinación de las anteriores. En este caso, se acoplan en línea un bloque alimentador y un cabezal multidistribuidor.

Se pueden coextruir polímeros con viscosidades y temperaturas de procesado muy diferentes. Por ejemplo, si se deben coextruir un polímero termosensible y otro de alto punto de fusión, el polímero termosensible se envuelve con capas de adhesivo en un bloque alimentador, y de ahí pasa a un distribuidor, mientras que el otro se extruye por otro distribuidor. De nuevo, la unión de todas las capas tiene lugar en la zona paralela de la boquilla.







- Extrusión de film tubular
- Extrusión de film plano

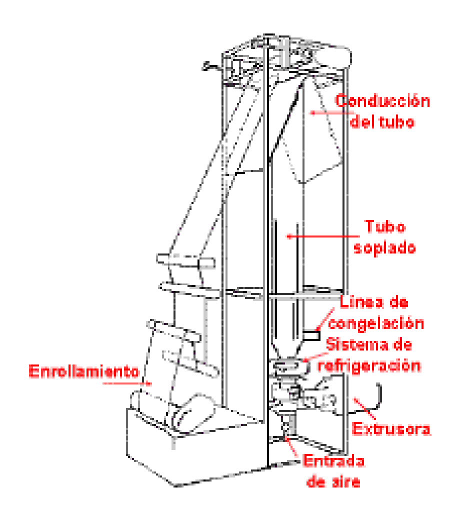
Estudiaremos la relación que existe entre estas dos técnicas:

- Relaciones entre filmes tubular y plano
- Ventajas y desventajas de los distintos métodos

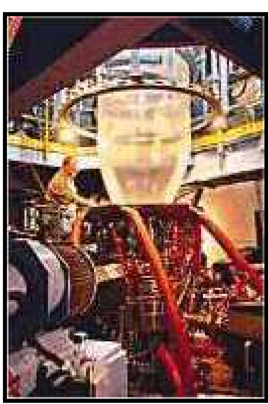


Extrusión de Film

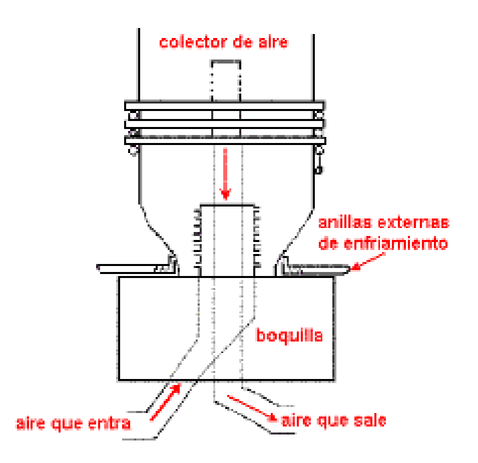
Extrusion de film tubular



La mayoría de los filmes se extruye obligando a pasar el plástico fundido hacia arriba a través de una boquilla de forma circular. Se obtiene así un tubo que se infla mediante aire a presión. Se enfría el filme por aire mediante aire a gran velocidad distribuido de forma anular por un anillo que rodea al tubo soplado. Este se aplana mediante tablas guía convergentes o un grupo de rodillos y se conduce mediante un par de cilindros a una estación de enrollamiento. Si el film es cortado y sellado por calor, dará un rollo de bolsas.



La figura siguiente muestra la zona de la boquilla con más detalle:



La anchura del film tubular soplado está controlada por la cantidad de aire en la burbuja. La anchura de rollo suele ser menor, puesto que se pliega con pestañas:



Veamos los siguientes aspectos de la extrusión film tubular:

- Equipo para film tubular
- Relación de soplado y de estiraje
- Tratamiento



El equipo para film tubular

Con mucho la mayor parte del film que se fabrica es film soplado y el material más utilizado es el PE (tanto de alta como de baja densidad). Otros materiales utilizados en la fabricación de film soplado son PP, PA, PVC y PS espumado.

Los componentes más importantes del equipo para la fabricación del film soplado pueden verse en la figura. Una extrusora de bancada baja envía a velocidad constante una corriente de material fundido a una hilera que extruye verticalmente hacia arriba un anillo de pared delgada de material fundido. Es importante que el espesor de este anillo de material que abandona la hilera sea uniforme. Este anillo es hecho pasar a traves de los rodillos de pinzado (nip rolls) provocando el arrastre vertical hacia arriba del anillo extruido. La velocidad a la cual se haga girar a estos rodillos afectará al espesor del film producido y a su nivel de orientación en esta dirección.



El equipo necesario para filme tubular es el siguiente:

- Cabezal boquilla
- Equipo de enfriamiento y calibrado
- Línea de enfriamiento
- Equipo de estiramiento y enrollamiento del filme tubular



Cabezal - boquilla

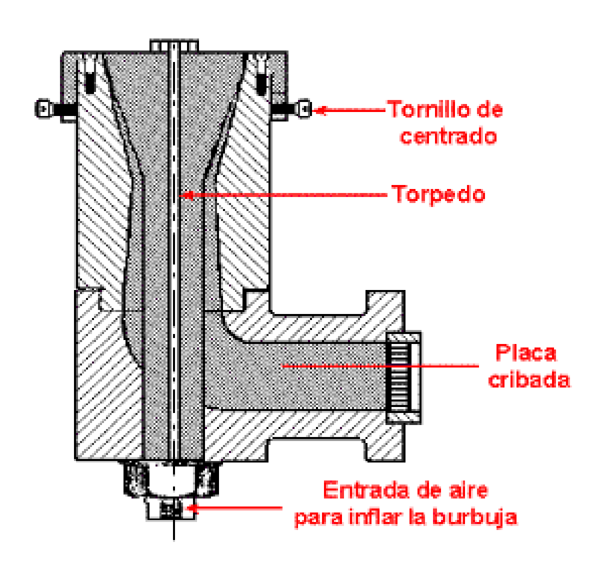
Existen tres variantes: el cabezal de alimentación lateral y el cabezal con alimentación interior. Estos diseños presentan distintos inconvenientes, que se evitan con el cabezal tipo espiral, que es la solución más moderna y empleada actualmente.

Cabezal de alimentación lateral

La presión del fluido que entra a la base de la matriz causa leves desplazamientos del torpedo con relación al cuerpo de la boquilla. La magnitud del desplazamiento depende de la presión de extrusión, por lo que es necesario reajustar el centrado del torpedo cada vez que varían las condiciones de proceso (r.p.m., abertura de la boquilla...).

Además, la alimentación lateral hace que el camino de flujo sea mayor para el polímero que sale por las zonas más alejadas a la entrada, por lo que la caída de presión en los labios de la boquilla varía con la posición.

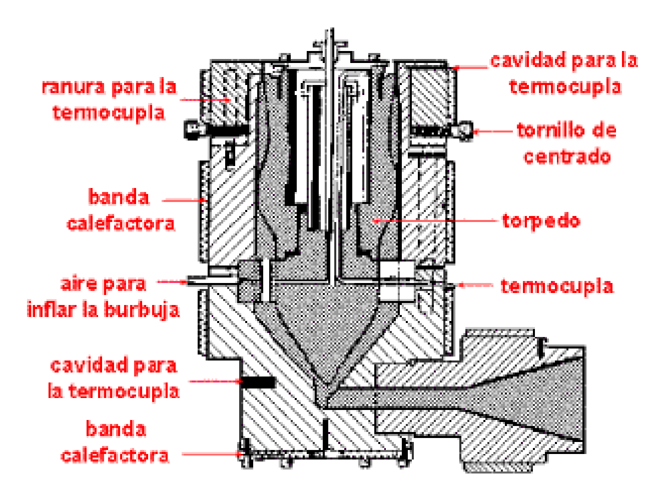
Aun así, se puede conseguir una velocidad de flujo uniforme mediante el ajuste adecuado de la boquilla, lo que implica descentrarla. Por ello, si las condiciones de proceso varían, variará también el mapa de presiones, lo que de nuevo hace necesario el ajuste de la boquilla. Este tipo de boquillas presenta una línea de soldadura y no son rotatorias.
Esta boquilla es apta para los filmes de menor diámetro.



Cabezal de alimentación central

Este diseño asegura un flujo uniforme en todo el perímetro de la boquilla. Ahora bien, el mandril debe soportar la presión ejercida por el fundido, por lo que su diseño debe ser robusto. Las patas de araña necesarias para sostenerlo crean varias líneas de flujo. Su efecto se minimiza mediante un diseño perfilado del soporte.

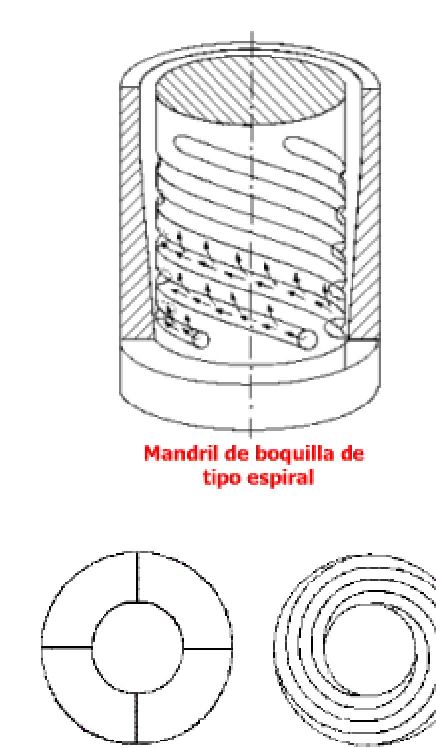
Para obtener filmes de espesores homogéneos emplear cabezal-boquillas de alimentación central especiales, que pueden rotar lentamente mediante un motor, También pueden tomarse otras acciones. Con extrusoras pequeñas, es frecuente colocar la extrusora en posición vertical con una boquilla en línea, haciéndose oscilar el sistema. Otra opción, válida tanto para esta boquilla como para la de alimentación lateral, es hacer oscilar el sistema de recogida.

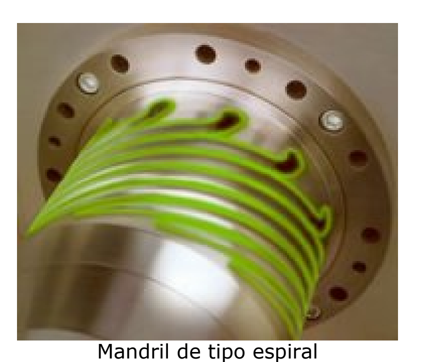


Boquilla de tipo espiral

Para superar los problemas asociados a las líneas de soldadura e inhomogeneidad de espesor del film se han desarrollado las boquillas de extrusión con mandril espiral. El fundido que entra se distribuye radialmente por varios canales separados tallados en la superficie del mandril, iniciando un flujo helicoidal hacia la salida de la boquilla. La separación entre el cuerpo de la boquilla y el mandril aumenta hacia la salida de la boquilla, mientras que la profundidad de los canales helicoidales disminuye, de modo que el flujo cambia de manera progresiva de helicoidal a axial.

El fundido se alimenta usualmente a través de un canal central conectado a un sistema de bebederos radiales (a veces llamados puertas).
En la práctica se emplean 1 ó 2 canales por cada pulgada de diámetro de la boquilla.
Por ejemplo, es posible producir un film de LDPE de 6 μm a una velocidad de 140 m/min.




Mandril de tipo espiral


Boquilla de tipo araña

Equipo de enfriamiento y calibrado

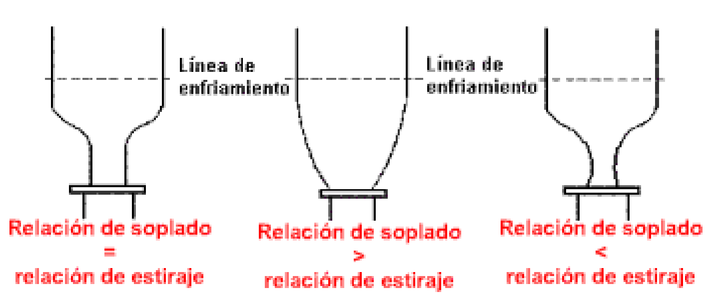
Alrededor y por encima de la boquilla se sitúa un anillo a través del cual se sopla aire de refrigeración sobre el filme. Debido al gran volumen de aire que se necesita, suele ser ancho y voluminoso (Fig. 3.26). El aire fluye por dentro del anillo dando un flujo uniforme, sin chorros, todo alrededor del anillo. El filme se sopla y estira simultáneamente longitudinal y transversalmente cuando sale por la boquilla.



Línea de enfriamiento

Con frecuencia suele observarse cuándo tiene lugar la línea de cambio entre el fluido viscoso que sale por la boquilla y el filme sólido ya frío. Suele tener lugar a la altura a la que el filme tubular alcanza su diámetro definitivo.

Una línea irregular, no horizontal e inestable (sube y baja) es indicación de que algo anda mal en el proceso y puede dar lugar a un filme de mala calidad. La línea de cambio se llama línea de enfriamiento y a veces (en materiales semicristalinos) se nota por la diferencia de transparencia entre ambas zonas.



Equipo de estiramiento y enrollamiento del filme tubular

El tubo soplado pasa entre dos planos convergentes que son resbaladizos y de superficie mate para evitar que se pegue el filme. Estos dirigen el film hacia dos rodillos de presión (uno de caucho y otro de acero), que actúan como tren de arrastre. Por último, el tubo se corta y se devana en rollos de filmes planos o bien se enrolla como tubo para fabricar después sacos o bolsas.



Relación de soplado y de estiraje

La relación de soplado se define como:

$$\textbf{relación de soplado} = \frac{\varnothing_{tubo}}{\varnothing_{boquilla}}$$

Por otro lado, la anchura del film plano es:

$$Anchura = \frac{1}{2}(\pi \varnothing_{tubo})$$

Por tanto, si se desea producir un film tubular de una anchura dada, el diámetro del cabezal necesario puede obtenerse a partir de la relación de soplado:

$$\varnothing_{boquilla} = \frac{2}{\pi}\frac{Ancho}{rel.sopl.}$$

La relación de estiraje se define como:

$$\textbf{relación de estiraje} = \frac{V_{rodillos}}{V_{boquilla}}$$

Es la relación entre la velocidad del film en la zona de los rodillos con la velocidad del film a la salida de la boquilla.

Teóricamente una relación de soplado alta suministra filmes más resistentes, pero en la práctica conduce también a una cierta inestabilidad de la burbuja de aire y amplifica todas las imperfecciones de la boquilla. En la práctica la relación de soplado varía de 1,5:1 a 6:1, siendo 3:1 un valor típico. Al ser el estiramiento transversal (relación de soplado) y longitudinal (relación de estiraje) similares, la reducción de espesores es de 10:1.



Tratamiento

La mayoría del film empleado en embalaje está decorado o escrito con fines publicitarios. Para ello debe ser previamente tratado, puesto que de otro modo la tinta no se pegaría. El tratamiento consiste en pasar el film antes de enrollarlo por un aparato de descarga eléctrica, lo que modifica su naturaleza química superficial.

Deslizamiento y bloqueo

Hay dos propiedades muy importantes de los filmes soplados que dependen de las cantidades de aditivos especiales empleados. El deslizamiento y el bloqueo. La cualidad de deslizamiento de un film sobre sí mismo es importante para que su devanado o bobinado sea correcto y evitar la aparición de arrugas o plieges. El bloqueo es el pegado del film cuando es plegado debido a una temperatura alta, de manera que no puede ser devanado.

Propiedades mecánicas

El film obtenido debe presentar una alta ductilidad.

La ductilidad de un film se desarrolla durante los procesos de estiraje y soplado, debido al alineamiento biaxial de las moléculas. En los procesos de extrusión de tubos o perfiles, la dirección transversal al estiraje es la dirección débil, situación que no se debe encontrar en la extrusión - soplado. Los films obtenidos mediante extrusión plana presentan peor ductilidad.

La extrusión - soplado puede emplearse para obtener films contraibles con el calor. Cuando se envuelve un producto en el film, si el film se calienta durante un momento, el plástico se contrae comprimiendo el producto. La contracción se debe a las tensiones congeladas (cadenas moleculares orientadas) en el film cuando este se procesó. La capacidad de contracción aumenta procesando a bajas temperaturas y con relaciones de estiraje y soplado altas.

Los productos obtenidos guardan una orientación residual. Sin embargo, estos productos no se denominan productos "orientados". Se habla de productos orientados cuando gracias al estiraje se consiguen aumentos en resistencia mecánica del 100 al 500 %, como en la extrusión de fibras. Sin embargo, el aumento en la resistencia en un film soplado es del orden de un 10 a un 20 %.

Materiales empleados

El PE - LD es con mucho el material más empleado en la fabricación de filmes tubulares, perteneciendo casi todo al tipo de PE - LD y PE - MD. Últimamente se ha desarrollado también procesado de filmes de PP especialmente orientado. También se extruyen filmes de PVC y PET.

Productos y tamaño de los equipos

El mejor mercado del filme está en el envase y embalaje, donde se suelen emplear filmes de 0,025 a 0,05 mm. El espesor mínimo de los filmes de PE es de 1 μm (0,001 mm), limitado por la poca resistencia mecánica y excesiva adherencia. Los equipos para filmes pueden suministrar espesores de hasta 0,5 mm.
La velocidad de extrusión está limitada por la velocidad a la cual se puede enfriar la burbuja.



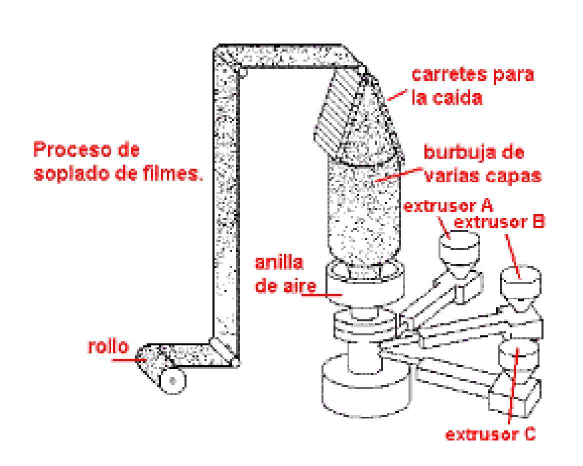
Los filmes se venden en rollos, bien en forma de tubo aplastado, con una o dos pestañas, o bien en forma de una capa única plana por corte del tubo según una o dos generatrices.

Coextrusion

La coextrusión se emplea en diversas aplicaciones de embalaje para obtener buen aislamiento a la humedad, propiedades de barrera de gases, etc. a costes reducidos. Por ejemplo, una combinación de PE / nylon / PE es muy usada en embalaje de productos deshechables esterilizados. Una combinación LDPE / HDPE se usa para film contraible y bolsas de compra para obtener un balance entre rigidez y bajo costo. La coextrusión PS/ PS espumado se usa en la producción de cartones de huevos y bandejas de carne.

a) Métodos de coextrusión de filmes

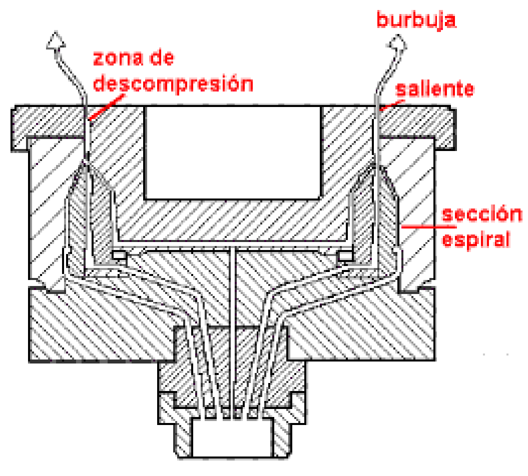
Los filmes coextruidos se fabrican por un proceso de extrusión y soplado tubular o por extrusión a través de boquilla plana sobre unos cilindros o rodillos de enfriamiento. El proceso de extrusión soplado es un método más flexible en cuanto a la diferencia de viscosidad permisible en el fundido, al control del equilibrio de la orientación en el filme en ambas direcciones (axial y transversal) mediante la relación de soplado, y en cuanto a la facilidad de distribuir mejor las variaciones de espesor en el filme.



El proceso de colada es más adecuado para grandes producciones debido a sus mayores velocidades de producción por un enfriamiento más rápido en unos rodillos refrigerados.

b) Cabezales y boquillas de coextrusión

Un cabezal usado para fabricar filmes multicapas es el tipo tubular. Consta de varios distribuidores concéntricos (tres en el caso de la figura), pero los hay de hasta 7 o más. Estos cabezales deben suministrar un flujo concéntrico uniforme de todas las capas, ya que no es posible ajustar el espesor de cada una de ellas en sentido circunferencial.





Extrusión de film plano

La extrusión de film plano produce un producto de brillo, usado principalmente en envasado, para envolver alimentos, etc.

Se emplean estirajes muy altos, del orden de 10:1, lo que posibilita mayores aperturas de boquilla (p.e. 0,5 mm) para:

- Conseguir mayores velocidades de extrusión y menor tiempo de residencia.
- Reducir la presión en la boquilla.



Hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

- Enfriamiento en cilindros
- Boquilla
- Enfriamiento en baño de agua

Enfriamiento en cilindros

El fundido cae verticalmente sobre el primer cilindro que está enfriado por agua, haciendo contacto según una línea recta horizontal. Para ello, el cilindro y la boquilla deben ser paralelos. En caso contrario se pueden producir arrugas en la película, sobre todo en espesores finos. Se puede emplear uno o dos rodillos de enfriamiento. El primer rodillo es el que extrae la mayor parte del calor del film, y el segundo reduce aun más su temperatura de modo que resulte más manejable.

Estos rodillos son de acero y tiene superficie de espejo. Su acabado es pulido y cromado. El rodillo va enfriado mediante agua entre 50 y 65 ºC.



Boquilla

Se emplean únicamente boquillas en forma de percha o cola de pescado, y usualmente se extruye hacia abajo. Los labios suelen ser puntiagudos para acercarse lo más posible al cilindro de refrigeración. Lo que hace diferente un proceso de otro es fundamentalmente el estiraje: En planchas el estiraje es muy pequeño, mientras que en films es usualmente 10:1. Así, para obtener películas de 0,025 a 0,075 mm (25 a 75 μm), la abertura normalmente es de 0,5 mm.

En general, la separación entre boquilla y rodillo se minimiza (2 - 5 cm) con el objeto de suprimir la cristalización (ello es beneficioso para conseguir una alta elongación en procesos posteriores de orientación/estiraje del film frío). Ahora bien, el alto grado de estiraje en una distancia tan corta requiere una alta capacidad de elongación del film, por lo que se emplean altas temperaturas de proceso (unos 250 ºC en PE). Si se enfría muy rápido, se forman esferulitas muy pequeñas en una matriz básicamente amorfa. Puesto que la Tg del LDPE es -100 ºC, la rigidez del film obtenido es muy pequeña (se comporta como polímero amorfo por encima de su Tg). Por ello, es necesario dejar mayores separaciones boquilla - rodillo (5 - 8 cm). Con el HDPE, la separación puede ser sólo 1 cm.

Enfriamiento en baño de agua

La distancia entre los labios de la boquilla y el nivel del agua en el tanque de refrigeración debe ser pequeña (similares al proceso anterior), de modo que tanto el estiraje como el enfriamiento sean rápidos.
La separación boquilla - agua afecta a la claridad y la rigidez (cristalización), mientras que el estiraje afecta al espesor. la temperatura del agua debe mantenerse entre 20 y 65 ºC
Las boquillas de film se bloquean o dañan fácilmente por materia sólida en el polímero, usualmente se emplean finos paquetes de rejillas, lo que aumenta la contrapresión en la extrusora. Hay que tener en cuenta que los geles de polímero de alto peso molecular son altamente elásticos y pueden deformarse para pasar por los filtros y boquillas, recuperando su forma a la salida de la boquilla y dando defectos en el film acabado como "ojos de pescado".

La figura siguiente muestra una instalación para la obtención de film plano biorientado.





Relación entre filmes tubular y plano

El filme tubular es más tenaz ya que en el proceso tiene lugar una orientación biaxial. Requiere menos inversión de capital por unidad de capacidad y es más adecuado para la fabricación de sacos y bolsas. También es más fácil de cambiar la anchura del filme sin desperdicios, simplemente soplando un tubo mayor o menor. Por otra parte, el filme plano es más transparente y brillante debido a que por un enfriamiento rápido se obtienen superficies muy poco cristalinas y/o de cristales más pequeños.

Ventajas y desventajas de los distintos métodos

	Ventajas	Desventajas
Filme tubular enfriado con aire	• Menores costes/kg. • Amplio margen de tamaños y espesor con un solo equipo. • Posibilidad de emplear varios grados de resina. • Buenas propiedades mecánicas (orientación axial y transversal). • Adecuado para tubos (bolsas, sacos, embalaje...).	• No desarrolla transparencia óptima (en cristalinos). • El enfriamiento por aire puede limitar la velocidad de producción.
Filme tubular enfriado con mandril metálico	• Control exacto del diámetro. • Mejor transparencia. • Adecuado para tubos y hojas. • Buenas propiedades mecánicas (orientación axial y transversal). • Enfriamiento positivo y por tanto mayor rendimiento.	• Se necesita un mandril para cada diámetro.
Filme plano enfriado con cilindro	• Máxima transparencia con cristalinos	• El film tiene pobres propiedades deslizantes.
Filmes planos enfriados con agua	• Buena transparencia con cristalinos	• Propiedades orientadas en la dirección axial. • El filme tiende a arrastrar agua, aún a baja velocidad.



Introducción

El moldeo por soplado es el tercer método en importancia en el procesado de termoplásticos, después de la extrusión y la inyección. Es principalmente un método de producción en masa, pensado para la fabricación de cuerpos huecos. El origen hay que buscarlo en la fabricación de botellas de plástico que sustituyeran a las de vidrio. Hoy en día, aunque la fabricación de botellas domina totalmente el mercado del moldeo por soplado, también se fabrican otros artículos como bidones, juguetes y artículos más técnicos (principalmente para automoción) llegándose a fabricar incluso piraguas.

Desde el punto de vista técnico y económico es una alternativa a otros procesos como la inyección y el termoconformado para cierto tipo de productos.

El proceso consiste en crear primeramente un elemento hueco de material termoplástico que posteriormente es introducida en estado gomoelástico en el interior de un molde donde es inflada (soplado) de manera que adquiere la forma de la cavidad. Una vez consolidada la forma (enfriamiento) se desmoldea el producto.


* Pulsa aquí para ver la animación



Ventajas e inconvenientes del proceso

A continuación se comentan las ventajas más evidentes de este proceso:

1.- Se pueden moldear cuerpos huecos con curvas muy irregulares, reentrantes y contrasalidas internas. Estas piezas son imposibles de conseguir en inyección (salvo que se utilicen núcleos fusibles) y para conseguirlas se debería a fabricar dos piezas por separado y a unirlas posteriormente con los consiguientes costes mayores y problemas de estanqueidad del producto final.

2.- El nivel de presiones en el soplado es muy bajo (1,5 - 20 bar según el tipo de resina a soplar) si se compara con el nivel de presiones en inyección. Las presiones menores proporcionan productos con un menor y más equilibrado nivel de tensiones residuales, lo cual significa una mayor resistencia mecánica (mayor resistencia al impacto, flexión, tracción, etc) y a las condiciones medioambientales.

3.- Es posible conseguir espesores de pared variable y modificar este espesor sin cambiar de molde, modificando las condiciones de proceso. Se pueden conseguir espesores muy delgados (casi como el papel) imposibles de conseguir por inyección convencional, pero sí por termoconformado (con ciertas limitaciones). De la misma manera se pueden conseguir espesores de pared gruesos.

4.- Se pueden utilizar polímeros difícilmente procesables por inyección debido a su baja fluidez como por ejemplo el UHMWPE (polietileno de ultra alto peso molecular). Esto significa la posibilidad de fabricar productos con unas elevadas propiedades de resistencia química (el alto peso molecular mejora la resistencia química en general: menor permeabilidad, mayor resistencia a la oxidación, mayor resistencia a los UV, mayor resistencia a la tensofisuración, etc).

5.- Los costos de procesado y utillaje son muy competitivos con respecto a otros métodos. En general los moldes son mucho más baratos que los de inyección y los tiempos de ciclo son también bastante menores.

Junto a las anteriores ventajas aparecen los siguientes inconvenientes:

1.- No es posible conseguir niveles de tolerancia tan estrechos como en inyección, ni en dimensiones generales ni en espesor. Es muy difícil (por no decir que imposible) conseguir una distribución de espesor uniforme en toda la pieza.

2.- El rango de materiales a procesar (de forma útil) es limitado.

3.- Existen piezas que nunca se podrán moldear por soplado pero si por inyección. El soplado crea piezas tipo superficie (cara externa es un offset de la interna) pero no puede moldear detalles como por ejemplo patillas y otro tipo de protusiones.



Procesos de soplado

Básicamente existen dos tecnologías o ramas fundamentales en el campo del soplado:

- Extrusión soplado
- Inyección soplado

Pero dentro cada campo se puede distinguir otra modalidad:

- Extrusión-estirado soplado
- Inyección-estirado soplado

Tanto en extrusión soplado como en inyección soplado, lo que se hace es partir de una preforma caliente que se introduce dentro de un molde de soplado. Dicha preforma es soplada en el interior del molde mediante aire a presión, adquiriendo así la forma de la cavidad del molde.

La principal diferencia entre ellas radica en la forma de obtención de la preforma. En la primera de ellas la preforma se obtiene por extrusión y en la segunda mediante moldeo por inyección. Ambas tecnologías pueden soplar la preformas con o sin estirado previo de las mismas.

Moldeo por extrusión soplado

En este caso la preforma se crea por extrusión de un tubo denominado manga o parisón. Esta preforma es atrapada entre las dos mitades del molde y a continuación soplada.



1) Cortador del parisón,
2) boquilla de la extrusora,
3) molde,
4) parisón

Según como se transfiera el parisón de la extrusora al molde se puede hablar de:

- Extrusión continua
- Extrusión intermitente



Sistemas de extrusión contínua del parisón



En la extrusión continua la extrusora funciona constantemente y se produce un flujo ininterrumpido de parisón, por ello puede utilizarse con cualquier tipo de resinas que sean aptas para el soplado, ya que al no pararse el flujo de material no da lugar a problemas de degradación del material. El objetivo es conseguir la mayor productividad.

Las ventajas principales de la extrusión continua son las siguientes:

- Da lugar a un fundido homogéneo con un perfil de temperaturas uniforme.
- Ya que no hay interrupción en la formación del parisón existen menos probabilidades de que el material se degrade, esto es particularmente importante para el PVC.
- Permite aprovechar la capacidad de plastificación de la extrusora para conseguir una alta cadencia de producción. Para conseguir esto habrá que acudir a técnicas multimolde que permitan seguir el ritmo de plastificación.

El principal inconveniente de la extrusión continua es que no es apropiada para fabricar piezas grandes ya que se produciría un estiramiento excesivo del parisón durante la extrusión debido a su propio peso, pudiendo llegar incluso a romperse.

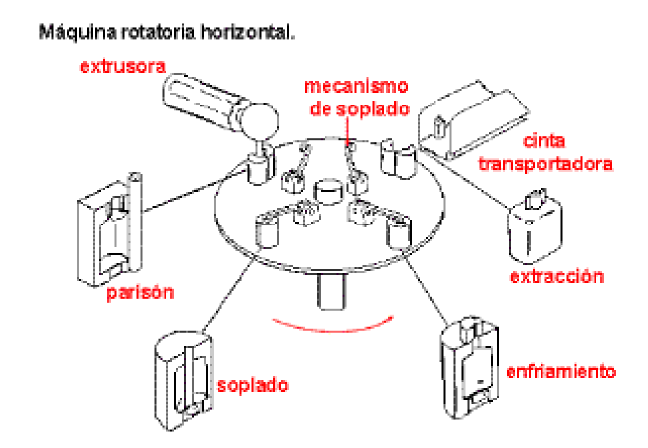
Existen varias configuraciones de máquina que extruyen parisón de forma continua:

- Sistema de mesa rotativa horizontal
- Sistema de mesa rotativa vertical
- Sistema de moldes desplazables (shuttle)
- Sistema de molde ascendente
- Sistema de cabezal ditribuidor múltiple con accionamiento alternativo
- Otras técnicas



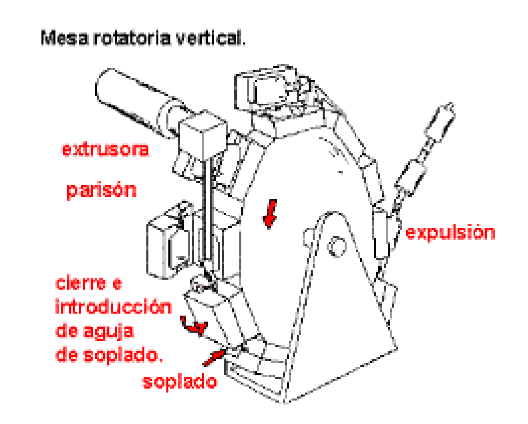
Sistema de mesa rotativa horizontal

Consta de un carrusel donde van colocados los moldes. En una de las estaciones del carrusel está posicionado el cabezal de la extrusora y se produce el atrapamiento del parisón por parte del molde. Una vez atrapado el parisón el molde gira a una segunda estación donde se produce el soplado de la preforma.

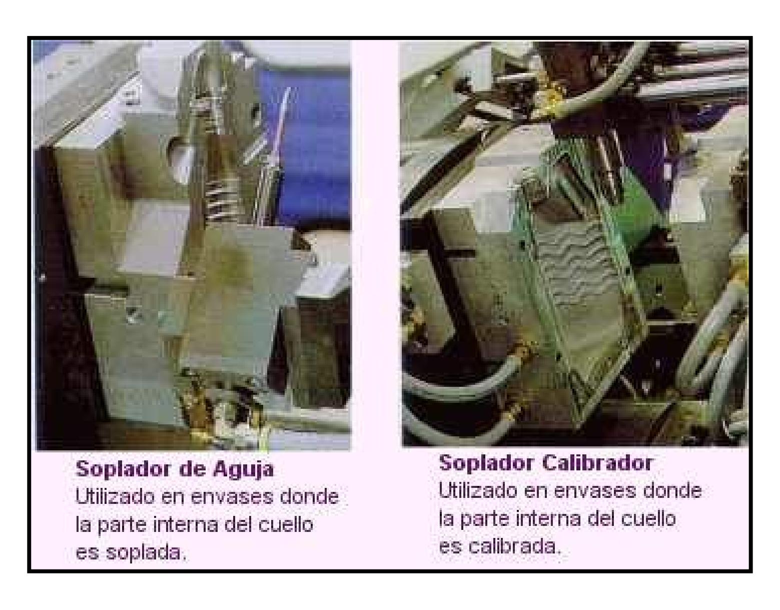


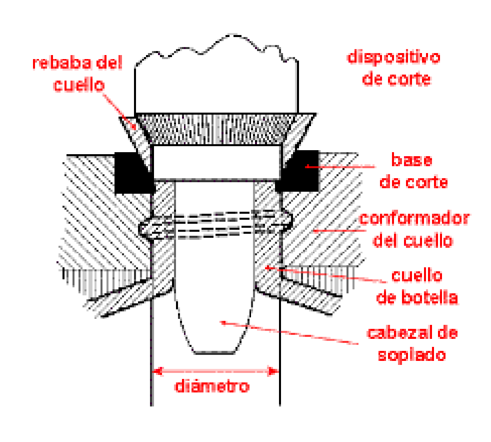
Sistema de mesa rotativa vertical

Es un concepto similar al anterior salvo que el parisón no es cortado, formando las piezas sopladas una ristra que después hay que recortar. El aire es soplado mediante una aguja que atraviesa el cuello de la botella.



Este método necesita por tanto unas operaciones secundarias de recorte de material en el cuello y en el fondo y genera un exceso de material de deshecho. Además el cuello y la rosca no están calibrados ya que se conforman exclusivamente por la presión del aire y no mediante la utilización de calibradores.

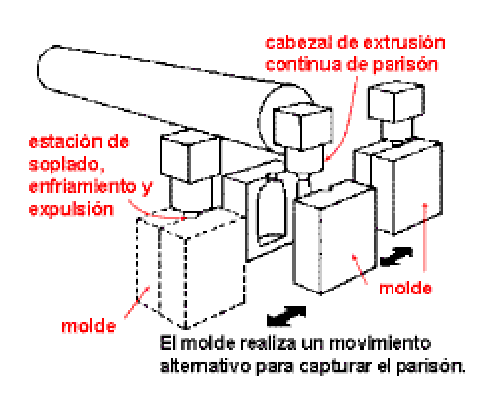






Sistema de moldes desplazables (shuttle):

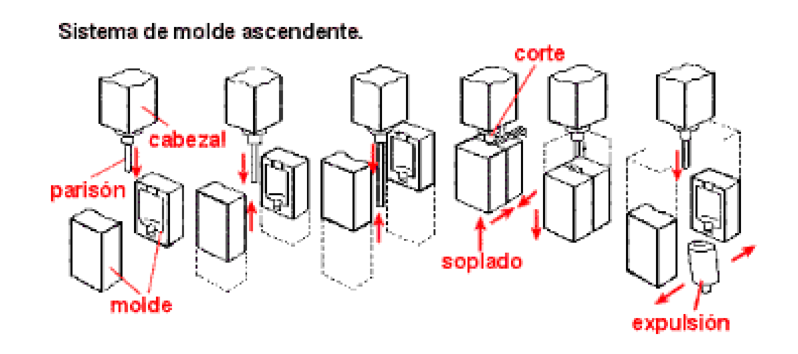
Este sistema se desarrolló en Europa inicialmente para la producción de botellas de PVC. Su capacidad de producción es menor que la de las técnicas anteriores. Aquí el cabezal de extrusión es colocado en posición central respecto a dos moldes. Los moldes pueden desplazarse de un lateral al centro para coger el parisón y del centro de nuevo al lateral para llevar a cabo el soplado, funcionando de forma intermitente de manera que cuando uno coge el parisón en el otro se produce el soplado y viceversa.



Este método dió lugar al desarrollo del cuello calibrado. El cuello calibrado se obtiene introduciendo un cabezal del soplado por el cuello de la botella cuyo diámetro exterior coincida con el diametro interior final del cuello de la botella, de manera que comprima el plástico en la zona del cuello contra las paredes del molde. De esta forma se origina una rosca sólida en vez de soplada. La parte superior del cuello se lleva también a sus dimensiones correctas de longitud mediante el corte de la rebaba por medio del cabezal de soplado.

Sistema de molde ascendente

En este caso el parisón cae continuamente y el molde realiza un movimiento ascendente-descendente. Asciende para atrapar el parisón y desciende para proceder a su soplado mientras se va creando el siguiente parisón.

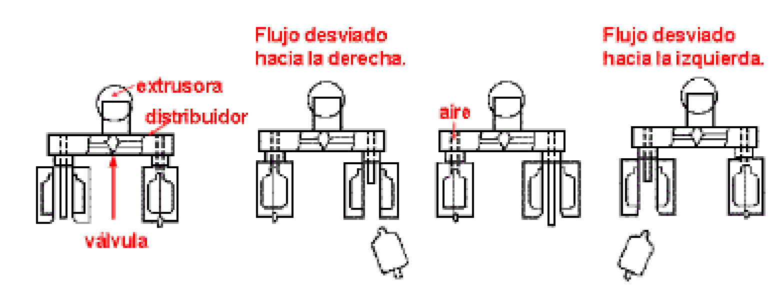




Sistema de cabezal distribuidor múltiple con accionamiento alternativo

Aunque a simple vista no lo parezca sigue siendo un sistema continuo ya que la extrusora no deja de girar.

En este caso una válvula desvía el flujo de parisón a uno u otro lado del distribuidor de tal forma que mientras a un lado se produce el soplado en el otro se crea el parisón hasta la longitud requerida. El soplado se realiza mediante cabezales de soplado concéntricos al cabezal de extrusión del parisón.



Otras técnicas

Incluyen la extrusión continua de parisón que es cortado y llevado al molde para ser soplado, permaneciendo el molde fijo, salvo para abrirse y cerrarse. También es posible fabricar preformas de manera continua y almacenarlas para después ser sopladas tras un calentamiento.

Sistemas de extrusión intermitente del parisón

En la extrusión intermitente el parisón no cae continuamente del cabezal de extrusión, sino que lo hace de forma discontinua. Este sistema es apropiado para la fabricación de piezas en materiales que no sean muy sensibles a la degradación.

Básicamente existen dos técnicas:

- Sistema on / off
- Sistemas con acumulador

Sistema on / off

No utilizado salvo en máquinas de laboratorio. Consiste en extruir un parisón hasta la longitud adecuada y entonces parar el motor de la extrusora. El motor de la extrusora es accionado de nuevo para que el próximo parisón esté listo cuando sea necesario. Entre cada parada y arranque se produce el soplado.



Procesos de soplado

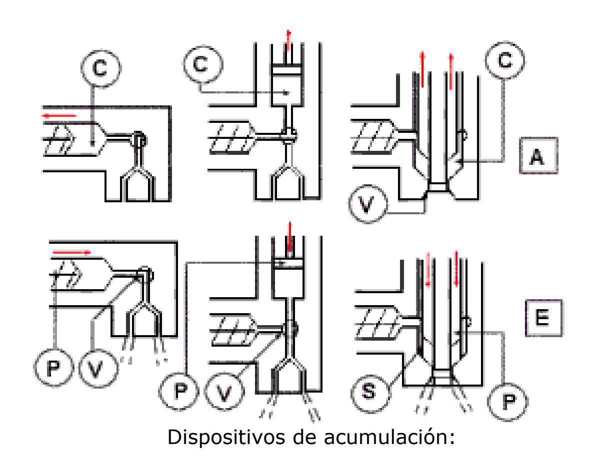
Sistemas con acumulador

No utilizado salvo en máquinas de laboratorio. Consiste en extruir un parisón hasta la longitud adecuada y entonces parar el motor de la extrusora. El motor de la extrusora es accionado de nuevo para que el próximo parisón esté listo cuando sea necesario. Entre cada parada y arranque se produce el soplado.

En este caso se trata de ir almacenando material plastificado en la cantidad suficiente en un acumulador, de forma que cuando sea el momento conveniente sea extruído con gran rapidez a través del cabezal para formar el parisón. En cada ciclo el acumulador debe vaciarse totalmente para minimizar la degradación térmica. Este sistema es particularmente apropiado para piezas grandes (bidones de HDPE) ya que debido a la elevada velocidad de extrusión a través del cabezal se minimiza el estiramiento y adelgazamiento del parisón.

Existen varios sistemas de acumulador:

- Husillo alternativo, similar a una máquina de inyección convencional, dosifica (mediante giro) y extruye (mediante desplazamiento lineal del husillo).
- Sistemas LIFO (last in first out).
- Sistemas FIFO (first in first out), que son los más convenientes ya que minimizan la posibilidad de degradación del material.



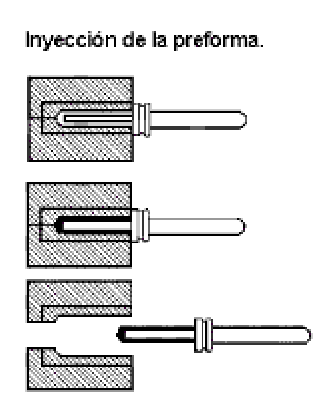
Dispositivos de acumulación:

[S]:Husillo alternativo; [L]:First in last out (FILO); [F]: First in first out (FIFO); [A]: Acumulación; [E]: Extrusión; (C): Carga; (V): Válvula, (P): Pistón; (S): Cierre.



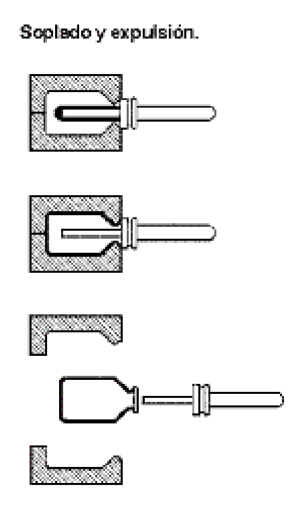
Procesos de soplado

Moldeo por inyección soplado



En este caso las preformas son obtenidas por inyección en vez de por extrusión. Las preformas suelen tener un espesor de pared variable de una zona a otra según sea la geometría final del producto a soplar.

Con este método se procesan materiales como el PET (casi mayoritariamente) y (en mucha menor medida) el PS que de momento no se procesan por extrusión soplado. La ventaja primordial sobre la extrusión soplado es que el acabado del cuello siempre es perfecto ya que viene moldeado por inyección. Además es un proceso sin rebabas, al contrario que en la extrusión soplado.



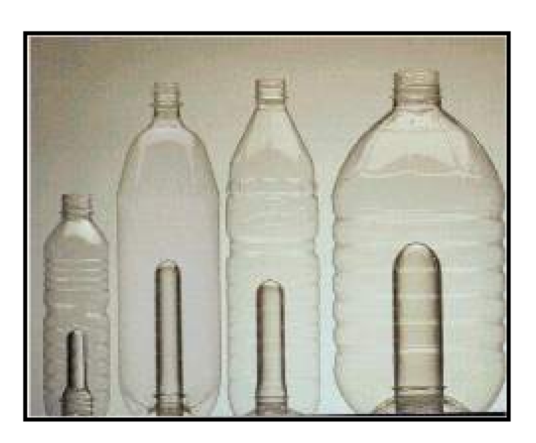
Sin embargo la inyección soplado está limitada en cuanto a tamaño y configuración del producto final. Como el macho de las preformas en el molde de inyección debe ser menor que el diámetro del cuello para permitir su extracción una vez soplado, la longitud de la preforma está limitada, ya que si el macho es muy esbelto (muy largo respecto a su diámetro) puede doblarse durante la inyección. Además la fabricación de preformas muy largas requerirían unidades de cierre de gran tonelaje (mayor recorrido de flujo y por tanto mayor presión de inyección). Tampoco es posible fabricar cuerpos con asas huecas (aunque si sólidas, moldeadas con la preforma). La distribución de espesores es muy homogénea de pieza a pieza, pero no se puede retocar el espesor de la preforma si no es cambiando el macho. El proceso tiene básicamente las siguientes etapas: En una primera fase se inyectan en una máquina de inyección las preformas.Normalmente se utilizan moldes rotatorios de varias cavidades. Una vez moldeadas las preformas son acondicionadas a la temperatura de soplado.
Cuando el molde de inyección de preformas se abre, los machos del molde giran con las preformas hasta la estación de soplado, donde se encuentra el molde de soplado.El molde de soplado se cierra sobre el macho que sostiene la preforma y se sopla aire a través de dicho macho, produciéndose el inflado de la preforma.El molde de soplado se abre una vez que la pieza se ha consolidado y se produce el giro de los machos con las piezas ya sopladas hasta una tercera estación donde las piezas son expulsadas (mediante aire, placas expulsoras, etc.).



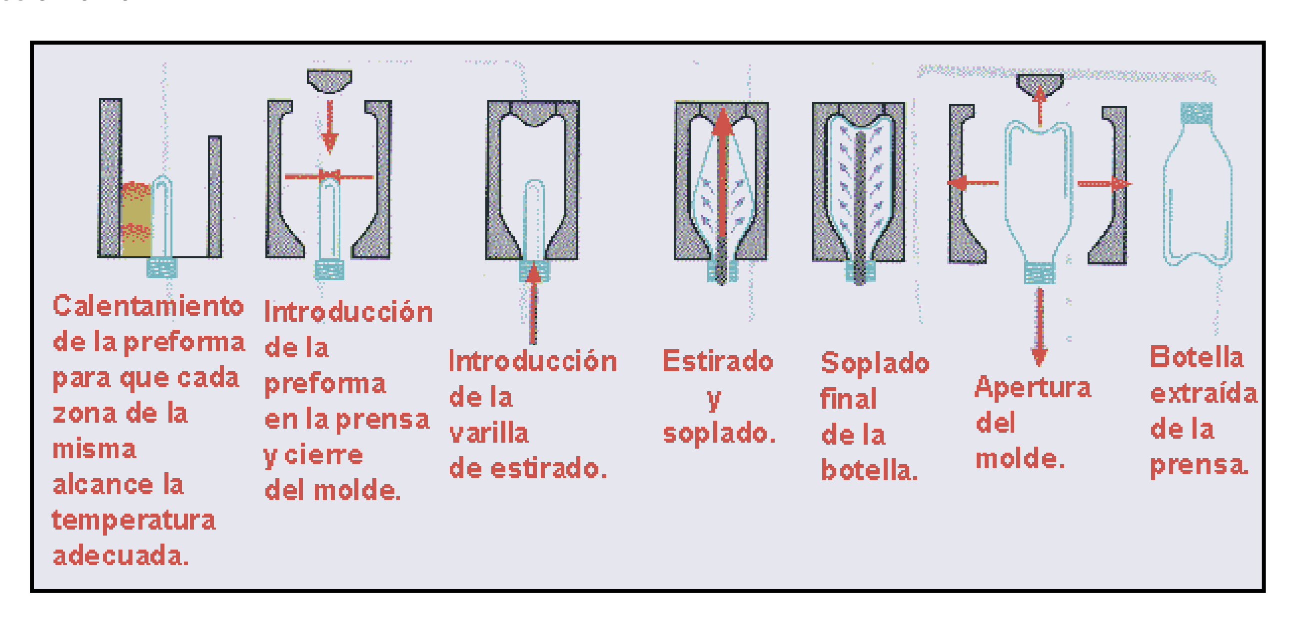


Moldeo por inyección - estirado soplado

Lo que se persigue con esta técnica es la biorientación del material la cual proporciona mejores propiedades de uso final a la pieza soplada. Además se consigue fabricar cuerpos de mayor volumen (hasta 5 l) y de menor espesor que con el proceso de inyección soplado, a la vez que resultan más resistentes.



La aplicación principal es la fabricación de botellas de 2 litros a partir de PET para bebidas carbónicas, obteniéndose una gran transparencia, resistencia e impermeabilidad a los gases, acompañado de una gran ligereza (pequeño espesor). En esta técnica la preforma se acondiciona a la temperatura óptima para el estirado, se procede a su estirado mecánico y se sopla. Las preformas inyectadas en PET deben tener estructura amorfa, razón por la cual se trabaja con moldes a muy baja temperatura. El PET amorfo tiene una temperatura de transición vítrea de Tg = 80 ºC. El PET debe inyectarse totalmente seco para evitar problemas de degradación por hidrólisis.
La temperatura de inyección debe limitarse a unos 30 - 40 ºC por encima de la temperatura de fusión para evitar la formación de formaldehido que afectaría al gusto y olor de los alimentos. El estirado de la preforma amorfa debe realizarse a una temperatura de 100 ºC, de esta forma se obtendrá una cristalización inducida por el estiramiento que proporcionará las propiedades mecánicas y ópticas deseadas. La presión del aire durante el soplado suele rondar los 20 bar. Las relaciónes de estirado que proporcionan las mejores propiedades en las botellas de 2 litros en el moldeo por inyección-estirado soplado son de 3,8 en la dirección circunferencial y 2,8 en la dirección axial.



A modo de resumen y con datos de 1994 el mercado de soplado está repartido de la siguiente manera:

- Moldeo por extrusión soplado: 75 %
- Moldeo por inyección soplado: 25 %, del cual el 75 % corresponde al moldeo por inyección - estirado soplado.



Propiedades de las resinas para extrusión soplado

Las propiedades ideales de una resina para soplado son diferentes de las de una resina para inyección o para extrusión. El moldeo por soplado requiere una alta resistencia del fundido así como una gran extensibilidad para permitir su inflado con facilidad y sin que se rasgue. Estas características van acompañadas por lo general de una elevada viscosidad a las temperaturas de procesado y de un alto peso molecular. El alto peso molecular se asocia a una resistencia mejorada al impacto y a la tensofisuración. Se pueden fabricar grandes piezas de HDPE de muy baja fluidez (MFI < 0,1 g / 10 min) sin grandes problemas. El HDPE se utiliza mucho en extrusión soplado debido a su bajo costo, resistencia del fundido y reciclabilidad, fabricándose con él botellas de leche, de detergentes, aceites lubricantes, bidones, etc. El LDPE se suele utilizar en aplicaciones de envases donde sea necesario apretar o estrujar el mismo con facilidad durante su uso para que el producto contenido en su interior salga (envases de cosmética y productos de limpieza). El PP y sus copolímeros se utilizan en aplicaciones donde el envase deba ser esterilizado o donde el envasado del alimento o bebida se realice en caliente. El PVC se utiliza para envasar algunos cosméticos, agua, aceites comestibles y algunos productos químicos del hogar.



Cabezales para extrusión soplado

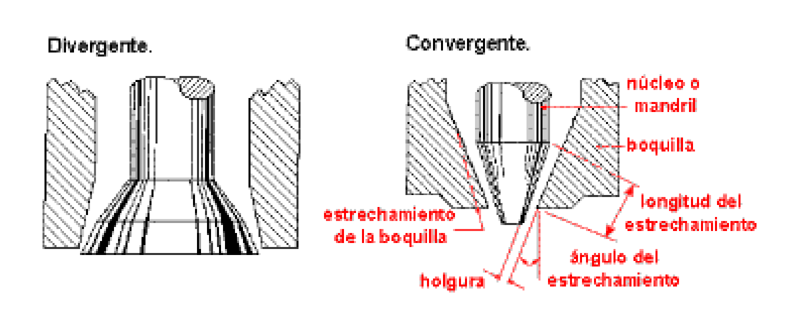
Todas las máquinas de extrusión soplado poseen un cabezal de extrusión del que se extruye un parisón o manga. El diseño de este cabezal es muy importante, ya que es determinante para la calidad del parisón y por ende del producto. El cabezal recibe el fundido de la extrusora, normalmente horizontal y desvía su trayectoria 90º de forma que abandona el cabezal verticalmente hacia abajo. Cuando el material fundido entra en el cabezal proveniente de la extrusora, su flujo se divide alrededor del mandril o torpedo, para volver a reunirse más adelante y formar así la manga o parisón (que no es otra cosa que un tubo). Según el material avanza por el cabezal se encuentra con un estrangulamiento, cuya misión es la de producir una contrapresión que asegure una buena calidad de la plastificación y de las líneas de soldadura. El nivel de estrangulamineto suele ser regulable. Además los cabezales presentan un anillo de centrado para corregir las diferencias de velocidades del polímero, que pueden originar que el parisón no caiga recto y que la distribución de espesores del mismo no sea uniforme.

El diseño del conjunto formado por el casquillo y el núcleo o mandril está determinado por varios factores, como pueden ser el tamaño de la pieza a soplar, su forma, peso, cuello y tipo de resina.

Básicamente existen dos tipos de núcleos:

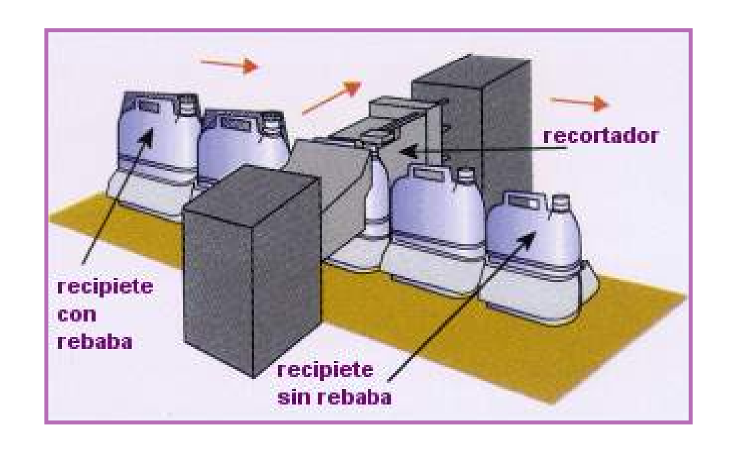
- **Divergente**: generalmente utilizado para fabricar grandes contenedores.

- **Convergente**: se utiliza en envases más pequeños, donde el parisón es encapsulado por el cuello del molde (parisón cautivo), originando piezas sin rebabas (salvo la de la base, donde el molde pellizca al parisón) ya que el diámetro del parisón es menor que la menor sección de la pieza.



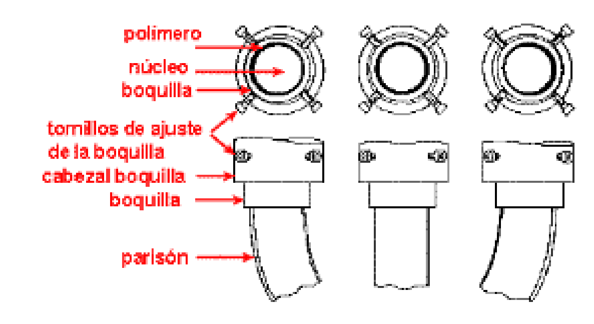


En las piezas con rebabas (piezas con asa, etc) el diámetro del parisón debe ser el correspondiente a la sección máxima (igual al perímetro máximo dividido por pi). En el cierre del molde se debe producir la soldadura del parison en la zona del asa (pellizco), dando lugar a una rebaba por encima del asa. La figura muestra un sistema de cortado de rebaba.

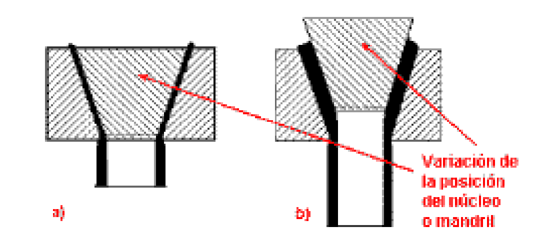


Con el fin de obtener un parisón apropiado se suele proveer al cabezal de dos posibilidades de ajuste: radial y longitudinal.

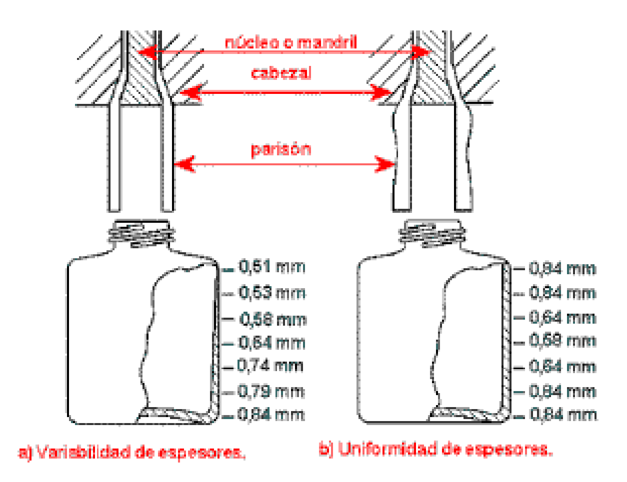
El ajuste radial se realiza mediante un casquillo exterior cuya posición respecto al núcleo (excentricidad) puede ser modificada mediante unos tornillos de regulación. La finalidad de este ajuste es conseguir un espesor uniforme en la sección recta del parisón, así como que éste caiga verticalmente, sin desviaciones. En definitiva, es un sistema idéntico al utilizado en las hileras de extrusión de tuberías.



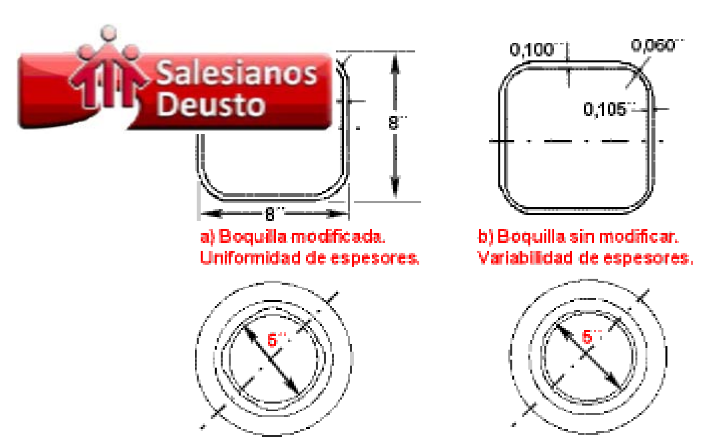
El ajuste longitudinal se realiza desplazando el núcleo o mandril verticalmente respecto al resto de la hilera. Este ajuste hace que el hueco (gap) de salida del parisón varíe y que por lo tanto lo haga también el espesor del parisón. Este ajuste se puede hacer a mano o mediante un actuador hidráulico controlado por un programador de parisón.
Mediante la programación del parisón se persigue obtener piezas con espesor de pared constante, variando para ello el espesor del parisón según este va siendo extruido, extruyéndose un parisón más grueso en las zonas donde el perímetro de la pieza sea mayor. Con el ajuste manual no se puede realizar este tipo de programación, sólo extruir parisones más o menos gruesos y por tanto obtener piezas más o menos gruesas.



Sólo unos pocos fabricantes, generalmente de máquinas pequeñas, suministran sus equipos sin control electrónico de parisón, aunque de todas formas suele ser considerado como un extra, definiéndose la capacidad de programación del control por el número de puntos (por ejemplo control del espesor de parisón en 50 puntos). En grandes máquinas con cabezal acumulador es posible utilizar otro sistema para controlar el espesor del parisón en la dirección longitudinal. Se trata de controlar la velocidad de extrusión del parisón mediante un perfil de velocidades, consiguiéndose de esta forma niveles distintos de hinchamineto del parisón y por tanto del espesor del mismo.

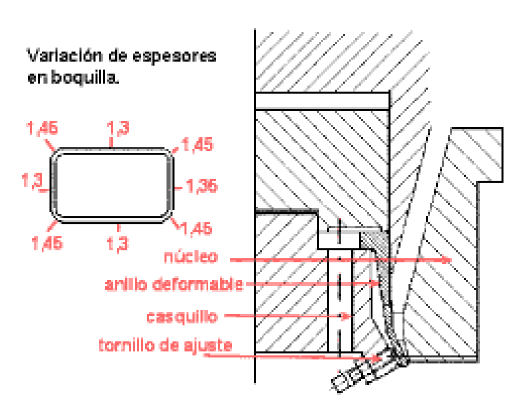


A menudo es conveniente utilizar cabezales en los que el casquillo no tiene sección circular con el fin de proporcionar un espesor lo más uniforme posible en la sección a soplar.



Se suele retocar la geometría del casquillo y no la del núcleo, para evitar problemas de posicionamineto o de giro del núcleo durante la extrusión. Esta modificación de la geometría del casquillo se suele realizar cuando se desea soplar geometrías de sección cuadrada o rectangular, ya que si no se llevase a cabo las esquinas de la pieza serían más delgadas que el resto de las paredes de la misma sección. También es conveniente realizar este tipo de retoque en los casquillos cuando se soplan cuerpos de sección elíptica.

En cuanto al procedimiento utilizado para retocar el casquillo es el de prueba y error, es decir se realiza la modificación y se procede a fabricar piezas hasta que se consigue el resultado deseado.



Este método de retoque del casquillo es costoso, pero una vez conseguido el efecto deseado funcionan muy bien.Se puede trabajar con cabezales que disponen de casquillos con anillos deformables elásticamente mediante tornillos accionados manual o automáticamente.

Un aspecto importante a tener en cuenta es el hinchamiento que experimenta el parisón al abandonar la hilera. Este hinchamiento hará que el diámetro y espesor del parisón sean mayores que los correspondientes de la hilera. El nivel de hinchamiento depende fundamentalmente del polímero utilizado (más concretamente de su comportamiento viscoelástico), pero para un mismo polímero el hinchamiento se ve afectado por las características geométricas de la hilera (especialmente la longitud de su zona de salida) y por la velocidad de extrusión (en definitiva por el tiempo de residencia del polímero en la zona de salida de la hilera, que debe ser suficiente para que las cadenas moleculares relajen su orientación).

Material	Hinchamiento (%)
HDPE	15 - 60
LDPE	30 - 60
PVC (rígido)	30 - 35
PS	10 - 20
PC	5 - 10
PPO	5 - 10
Nylon	5 - 15

Material	Hinchamiento (%)
Núcleo o mandril convergente	Aumenta
Núcleo o mandril divergente	Disminuye
Aumento temperatura parisón	Disminuye
Aumento velocidad extrusión	Aumenta
Aumento diámetro núcleo	Aumenta

Cuando se extruye un parisón grande, el espesor de pared va disminuyendo según el peso del parisón va aumentando. Una manera de compensar este adelgazamiento consiste en variar la posición del núcleo de manera que el espesor del parisón aumente y contrarreste el adelgazamiento debido a su propio peso.

En el diseño de los cabezales debe tenerse en cuenta que los canales a través de los cuales circula el polímero no deben presentar zonas de estancamiento o retención de flujo. Además el acabado superficial interno de la hilera debe ser de gran calidad, sin rugosidades, debiéndose prestar especial cuidado a su manipulación (evitar rayarlo o los golpes).

Tipos de cabezales para extrusión soplado



Cabezales para extrusión soplado

Tipos de cabezales para extrusión soplado

El objetivo de las hileras para film soplado es conseguir un anillo extrudado de calidad y de espesor uniforme.

El cabezal de extrusión soplado puede ser de tres tipos:

- De flujo axial o cabezal patas de araña (spider leg)
- De flujo radial o alimentación lateral
- De tipo acumulador

Además hay que considerar los cabezales de coextrusión.

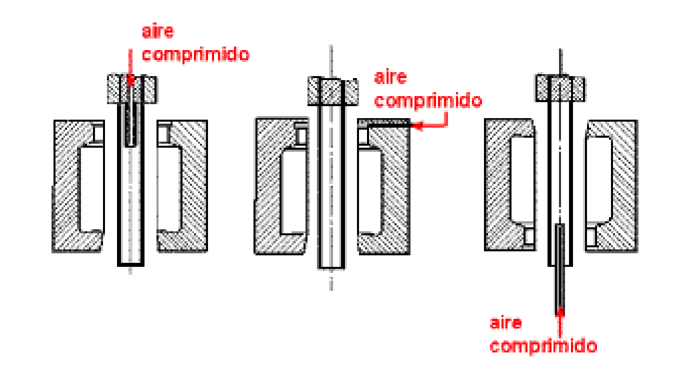


Soplado del parisón

Una vez que el parisón ha sido atrapado por el molde hay que proceder a su soplado para forzarlo a asumir la forma de la cavidad y reproducir los detalles de la misma. Para ello se utiliza aire a presión. El soplado tiene por tanto tres misiones:

- Expandir el parisón contra el molde.
- Ejercer presión contra el parisón expandido.
- Colaborar en el enfriamiento de la pieza.

El aire es introducido en el interior del parisón por medio de agujas o tubos. El tubo entra por el cuello del recipiente ajustando el parisón contra el molde en dicha zona. En ocasiones el tubo está colocado en el interior del mandril del cabezal. Cuando se utilizan agujas, estas atraviesan el parisón (son movidas por un actuador acoplado al molde) en posiciones determinadas del molde una vez que éste ha sido cerrado.

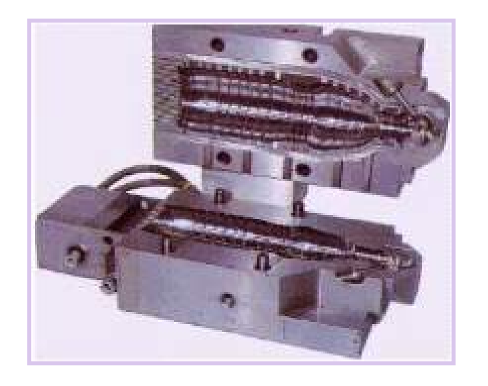




Soplador de Aguja
Utilizado en envases donde la parte interna del cuello es soplada.



Soplador Calibrador
Utilizado en envases donde la parte interna del cuello es calibrada.



Durante la fase de expansión del parisón en el proceso de soplado es aconsejable utilizar el mayor caudal de aire del que se pueda disponer, de tal forma que la expansión hasta las paredes del molde se realice en el menor tiempo posible. Además es deseable que la velocidad sea baja. Esto da lugar a que los orificios de las agujas y tubos sean grandes. Las presiones de soplado oscilan entre los 2 y 20 bar.

Diámetro del orificio de soplado (en mm)	Volumen de la pieza (en litros)
1,5	Hasta 1
6,5	1 - 4
12,5	4 - 205



Las presiones de soplado muy bajas dan lugar a piezas que no reproducen bien los detalles de la cavidad. Por otro lado, presiones excesivas pueden llegar a reventar el parisón. El área proyectada de la cavidad y la presión de soplado determinarán la fuerza de cierre necesaria (afectada de un factor corrector de 1,25).

Moldes para soplado

Los moldes para el soplado tienen una serie de detalles particulares que hay que considerar.

Materiales: Debido a las bajas presiones de moldeo se puede utilizar aluminio, sin embargo en el caso del soplado de PVC no se debe utilizar este material ya que lo corroe, debiendo en este caso utilizarse acero (con las cavidades cromadas) o Cu - Be (debido a la mejor conductividad térmica).

La gran ventaja del aluminio es su menor coste de mecanizado y la elevada conductividad térmica que posibilita ciclos más cortos (enfriamientos más rápidos). Veamos cuáles son las componentes de los moldes para soplado:



- Pellizco (pinch - off)
- Salidas de aire
- Refrigeración



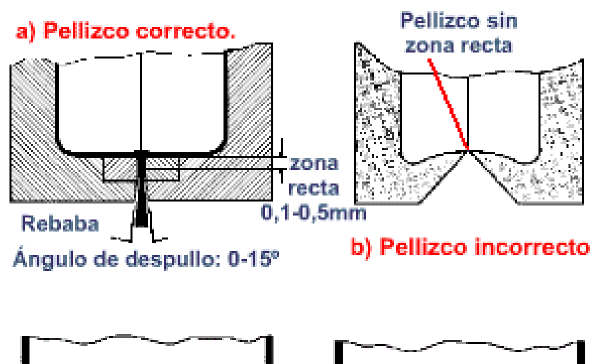
Pellizco (pinch - off)

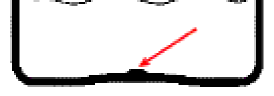
Se denomina así a la sección del molde donde el parisón es pellizcado y obligado a soldarse. El pellizco tiene que tener las siguientes características:

- Ser lo suficientemente resistente para aguantar la presión del material plástico y del cierre de forma continua.
- Debe empujar una cantidad de material plástico hacia el interior de la pieza con el fin de aumentar ligeramente el espesor de la soldadura.
- Facilitar el recorte posterior de las rebabas.

El pellizco debe tener una zona recta (land) antes de que comience el ángulo de despullo. Si no existiese esta zona recta, los bordes afilados del despullo darían lugar una soldadura acanalada. Las dimensiones del pellizco dependen del material polímero y del espesor de la pieza. El material de aluminio normalmente utilizado en el molde vale para el pellizco, teniendo éste una vida útil de uno a dos millones de ciclos si se opera con cuidado. Otras veces se trabaja con insertos de acero o Cu - Be (Cobre - Berilio), ya que son más duraderos y en caso de deterioro se pueden sustituir con facilidad.

En todas las zonas donde hay pellizco se produce la consiguiente rebaba. Para que esta no impida el cierre del molde se mecanizan en el molde unos rebajes o cajeras para las mismas.





a) Linea de soldadura correcta.



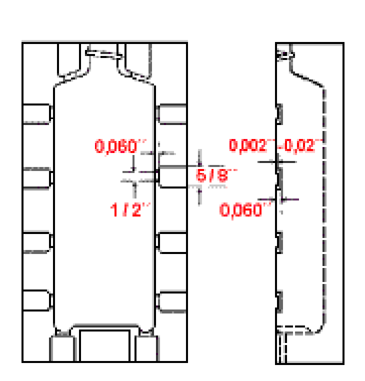
b) Linea de soldadura incorrecta.





Salidas de aire

Los moldes deben de estar dotados de salidas de aire, ya que el aire atrapado en el molde impide un buen contacto entre el parisón y la pared de la cavidad. Cuando se produce atrapamiento de aire la superficie de la pieza queda con un acabado rugoso y como con poros. Además el aire atrapado entre la pieza y la cavidad alarga el tiempo de enfriamiento. Para ventilar un molde se debe dotar a éste de salidas de aire mecanizadas en la partición. La partición del molde debe ser tal que contenga la sección más ancha de la pieza, ya que es hacia las zonas más alejadas del molde donde se ve empujado el aire (por ejemplo en un envase de sección cuadrada, la partición debe ser por la diagonal). También se deben dotar de salidas de aire a la zona del cuello y a las esquinas de la base, en general a las zonas donde se vea empujado el aire.

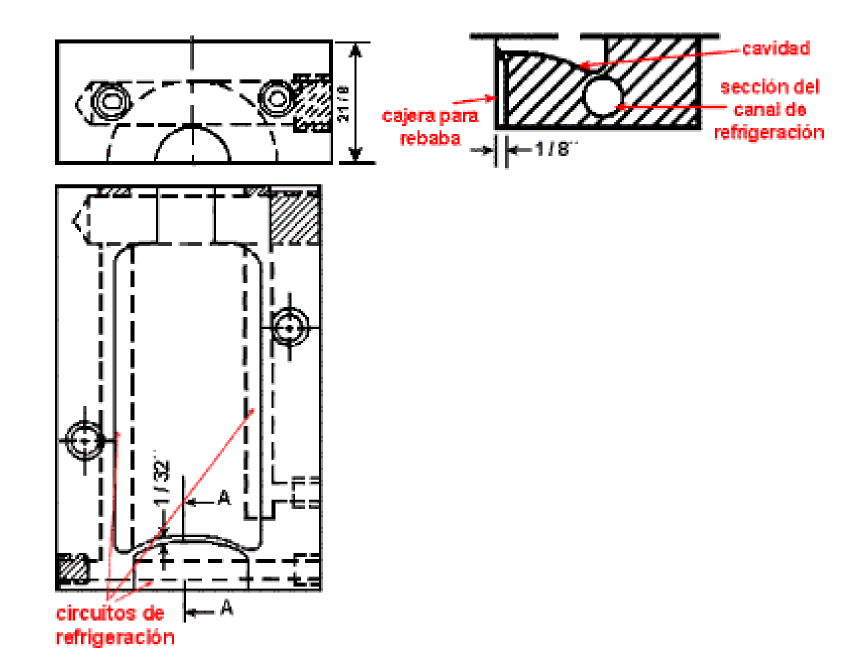


En caso necesario se puede practicar algún orificio para ventilar el molde en zonas difíciles, fuera de la partición. Estos orificios no deben quedar reflejados en la pieza. En el caso de moldeo de HDPE, es posible ventilar el molde utilizando un acabado chorreado de la cavidad, ya que debido a las relativas bajas temperaturas del molde (2 - 18 ºC) y a las bajas presiones de soplado, el HDPE no reproduce este acabado, permitiendo la fuga del aire a través de la red constituida por las diminutas rugosidades del acabado.

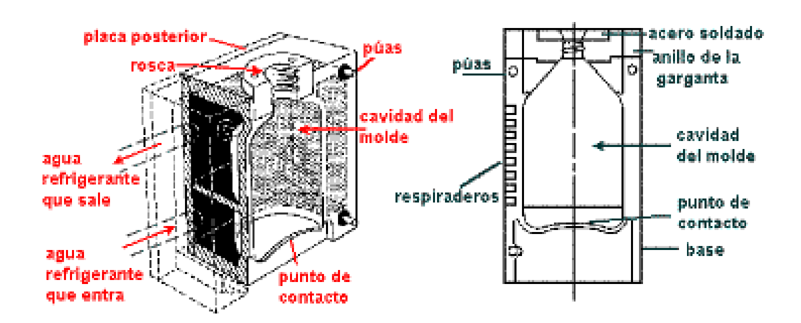


Refrigeración

Para poder conseguir las elevadas cadencias de producción los moldes deben estar convenientemente refrigerados. Esta refrigeración se consiguen haciendo circular un refrigerante a través de unos canales practicados en el molde (de manera similar a los utilizados en los moldes de inyección de termoplásticos). Para ayudar a la refrigeración en ocasiones se utilizan gases a baja temperatura (nitrógeno) en vez de aire a la hora del soplado. La siguiente figura representa el circuito de refrigeración de un molde. Las dimensiones están expresadas en pulgadas (1" = 25,4 mm).



En la siguiente figura se representan los diferentes componentes de un molde:





Introducción

El termoconformado es una de las técnicas más antiguas de procesado que se conocen.

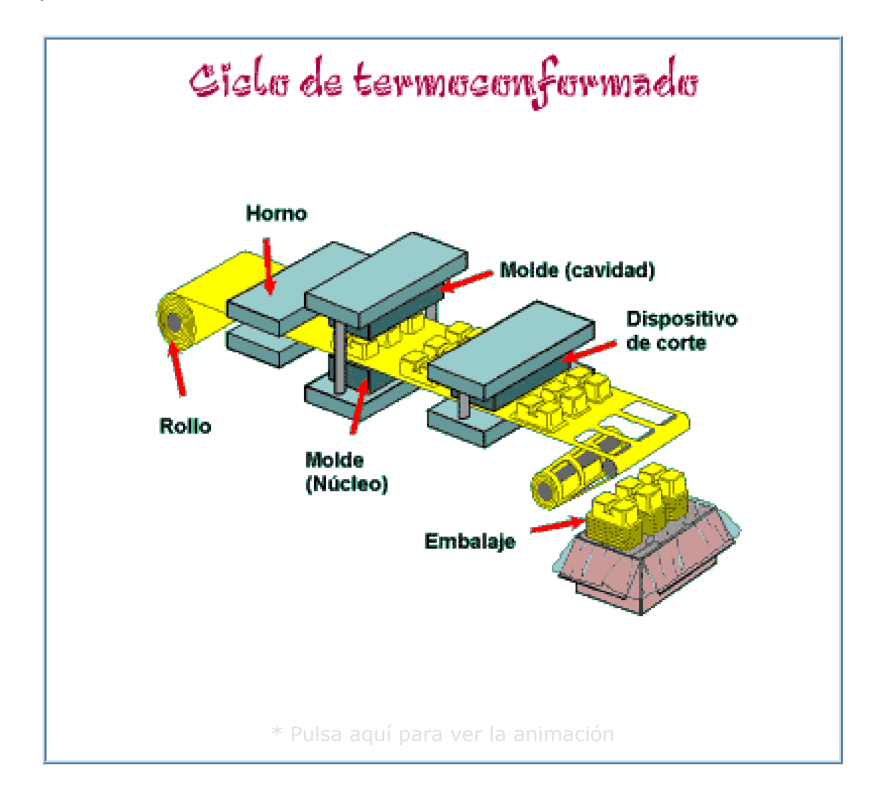
Básicamente consiste en calentar una plancha de material termoplástico hasta una temperatura a la cual el módulo de rigidez disminuye a un valor tan bajo que la lámina puede ser estirada aplicando fuerzas pequeñas, de tal forma que se le puede hacer adoptar la forma de un molde o modelo. La figura muestra diferentes productos obtenidos por termoconformado.



El termoconformado se diferencia principalmente de otras técnicas en que se parte de un material semielaborado, la plancha o lámina, producido previamente mediante otras técnicas (extrusión, calandrado) y no de polvos,pellets o compuestos de moldeo.

Además presenta otra diferencia fundamental frente a otros procesos y es que se le somete a un calentamiento general pero sin perder el estado "sólido" (no se "funde").

El termoconformado tiene múltiples aplicaciones (fundamentalmente envasado y embalaje) que enumeraremos más adelante y consumía en el año 1990, aproximadamente el 50 % de la producción mundial de planchas o láminas.

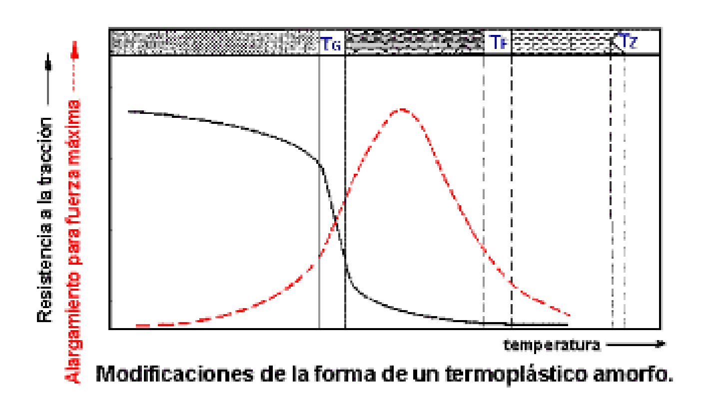




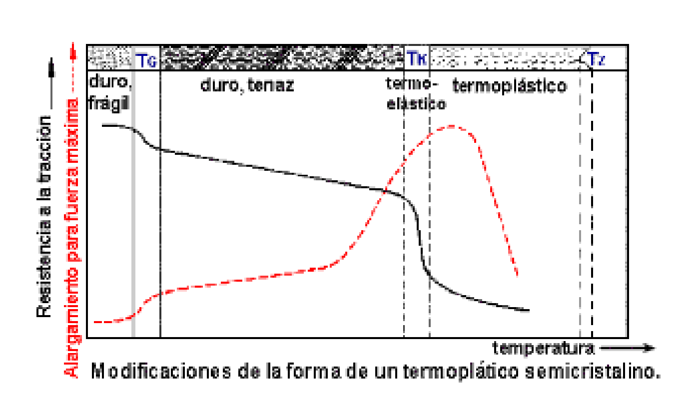
Materiales

En general se pueden termoconformar todos los termoplásticos, pero en la práctica esta disponibilidad se ve reducida a los amorfos y algunos semicristalinos. La razón de esto estriba en que es más fácil controlar el proceso con materiales amorfos ya que poseen un rango de temperaturas de procesado mucho más amplio. Para entender esto vamos a referirnos a las siguientes gráficas.

Lo que se pretende es llevar al material a unas condiciones en las cuales se puede alargar éste en gran cantidad ofreciendo a la vez poca resistencia al estirado sin rasgarse o desmoronarse. En los termoplásticos amorfos esto ocurre en el intervalo de temperaturas entre Tg y Tf. En los semicristalinos el intervalo de procesado es muy pequeño (intervalo termoelástico) a unos pocos grados por debajo de Tm, el problema se incrementa cuanto mayor sea el grado de cristalinidad.



Modificaciones de la forma de un termoplástico amorfo.



Modificaciones de la forma de un termoplático semicristalino.

Un plástico fácilmente termoconformable deberá tener una buena elongación en caliente, de tal forma que pueda ser estirado del orden del 500 % al 600 % sin rasgarse. Debe deformarse poco cuando la tensión es baja para evitar el pandeo o hundimiento debido a su propio peso y a la vez debe deformarse en gran cantidad con tensiones más altas pero aun así pequeñas.
La temperatura de distorsión por calor es una medida de la resistencia en caliente del plástico. El transformador buscará un rango de temperaturas de procesado dentro del cual el módulo elástico del material haya decrecido en varios órdenes de magnitud con respecto al que posee a temperatura ambiente, pero donde así mismo tenga suficiente elasticidad como para ser estirado sin que se rasgue en las esquinas de las piezas.

Para los amorfos, la temperatura mínima de procesado suele rondar 20 a 30 ºC por encima de la Tg y la temperatura normal de procesado está en el rango de 70 a 100 ºC por encima de Tg

Para los semicristalinos, la temperatura de procesado está en un rango pequeño por debajo de la temperatura de fusión Tm.

Ejemplo:

> En un PP de alta cristalinidad que posee un alto grado de rigidez hasta cerca del punto de fusión, la ventana de proceso puede ser muy estrecha (2 a 5 ºC).

Otra temperatura a tener en cuenta es la de desmoldeo (set temperature), que ha de ser tal que la pieza pueda ser desmoldeada sin sufrir distorsiones ni alabeos. Esta temperatura debe ser menor que la temperatura de distorsión por calor para una presión de 0,455 MPa. aproximadamente y suele ser unos 10 a 20 ºC menos que la Tg para los amorfos.

temperatura del molde debe ser inferior a la temperatura de distorsión por calor (0 a 10 ºC por debajo para los semicristalinos) (10 a 30 ºC por debajo de Tg para los amorfos). A mayor temperatura del molde, el acabado superficial es mejor, la calidad de las piezas es mejor, la resistencia al impacto es mayor, las tensiones internas disminuyen, los detalles se reproducen con mayor fidelidad, la distribución del material (espesores) es más uniforme y la calidad óptica es mejor (claridad, menor distorsión óptica). Sin embargo en piezas provenientes de lámina delgada se pueden utilizar moldes más fríos (moldes a 5 - 30 ºC) ya que debido al poco espesor las tensiones producidas no son elevadas y no suelen interferir con las propiedades de uso del producto.

Tal y como se ha comentado existe una temperatura mínima de procesado. Esta temperatura mínima marca un límite por debajo del cual aparecen siempre tensiones indeseadas en las piezas. Por tanto la lámina debe tocar el último confín del molde antes de que la temperatura descienda por debajo de este valor, ya que de otro modo aparecerán tensiones en dichas zonas que pueden dar lugar a alabeos y/o fragilidad.

Por otro lado la temperatura de conformado tiene un límite superior por encima del cual el material se empieza a degradar o se vuelve excesivamente "fluido" para poder ser conformado (se rasgaría).

Si las piezas son muy profundas o se va a realizar un estirado previo (preestirado) o aparecen detalles decorativos, entonces se opta por temperaturas de conformado altas (dentro del rango de temperaturas normales). Si no son muy profundas se pueden utilizar las temperaturas inferiores dentro del rango, lo cual posibilita ciclos más rápidos.

Como regla general la temperatura de conformado debe ser lo más alta posible, de esta forma se consiguen artículos de óptimas características en cuanto a la resistencia a la distorsión por calor.

También es posible desmoldear a temperaturas más altas que la mínima recomendada si se utilizan bastidores auxiliares para enfriar las piezas.

Material	Tipo	Tg (ºC)	Tm (ºC)	Temperatura distorsión por calor (ºC)	Temperatura de molde (ºC)	Temperatura de desmoldeo	Temperatura baja de conformado	Temperatura media de conformado	Temperatura alta de conformado
ABS	A	88 - 120	-	77 - 113	82	85	127	146	182
Acrilonitrilo	C	95	135	78		85	127	149	182
Acetato	C	70 - 100	230	52 - 93		71	127	154	182
PMMA	A	100	-	74 - 113	88	85	149	177	193
PVC	A	105	-	81		79	163	188	204
Butirato	C	120	140	54 - 108		79	127	146	182
PC	A	150	-	138	127	138	168	191	204
PET	C	70	255	49		77	121	149	166
Polietersulfona	A	230		216		204	274	316	373
HDPE	C	-110	134	79 - 91	71	82	127	146	182
Propianato	C			64 - 121		88	143	154 - 163	166
PP	C	5	168	107 - 121		88	143	154 - 163	166
PP (40% GF)	C		168	166		91	132	204	232
P-Sulfona	A	190		181	163	163	191	204	232
PS	A	94		68 - 96	82	85	127	149	182
PTFE / FEP	C		275	70		149	232	288	327
PVC rígido	A	90		57 - 82	60	66	104	138	154
PPO	A	104 - 110		110		99	163	188	204

Otro aspecto a tener en cuenta es la temperatura máxima de servicio a la que se podrá someter la pieza. Debido a que la deformación es recuperable (memoria elástica) a partir de Tg en los amorfos, la temperatura de servicio debe ser menor que Tg para que no se distorsionen las piezas.

El material, en el caso de ser higroscópico, debe ser secado para evitar la formación de burbujas y ampollas (el PVC, los estirénicos y las poliolefinas no suelen requerir secado).
También es posible termoconformar materiales coextruidos y materiales expandidos (PS).



Generalmente se pierde el 25 - 50 % del material utilizado (mermas o recortes) y se suele recuperar (triturado, mezclado con material virgen y reprocesado). La utilización de material recuperado influye más en la apariencia estética del producto que en sus propiedades mecánicas (aunque también influye).

Los materiales más utilizados en termoconformado son los amorfos (PVC, PS, ABS, PMMA fundamentalmente). Los semicristalinos suelen requerir más presión, un control más preciso de la temperatura debido a su estrecha ventana de proceso y generalmente no se pueden procesar de forma conveniente en maquinaria convencional, por ello se procesan en pequeño porcentaje (básicamente PP, PE y PET), aunque su importancia va aumentando de año en año debido sobre todo al desarrollo de nuevos equipos de procesado.

Como ya se ha comentado, la materia prima para el termoconformado viene en forma de semielaborado.

- Pequeño espesor (thin gage) e < 0,25 mm (hasta 0,07 mm)
- Espesor grueso (thick gage):
  - Medio 0,25 mm < e < 1,5 mm
  - Pesado e > 1,5 mm (hasta 12 mm)

Las láminas delgadas suelen venir en bobinas y tienen su aplicación casi exclusivamente en el área de envase y embalaje.

Las láminas gruesas pesadas vienen cortadas, apiladas y paletizadas generalmente aunque no siempre es así.



Conceptos y técnicas

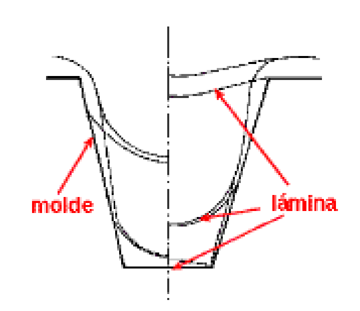
El termoconformado básicamente consiste en calentar una plancha de material termoplástico hasta una temperatura a la cual el módulo de rigidez disminuye a un valor tan bajo que la lámina puede ser estirada aplicando fuerzas pequeñas.

En este apartado se explicaran varios aspectos importatentes del proceso de termoconformado y las diferentes técnicas existentes.



Redistribución del material

Debido al estiramiento que sufre la lámina se produce una disminución del espesor medio de la misma. Esta disminución de espesor no es uniforme en toda la pieza. El hecho de utilizar una u otra técnica de termoconformado tiene su influencia en como quedan distribuidos los espesores. Conseguir un espesor uniforme es una tarea difícil, prácticamente imposible. La experiencia y el buen juicio harán que el transformador se decida por una u otra técnica. Una manera empírica de asociar el estiramiento al espesor conseguido (es decir de ver como se distribuye el material original sobre la pieza final) y que se utiliza ampliamente en la industria para estimar el calentamiento por zonas (pattern heating) consiste en trazar una cuadrícula en la plancha original. Esta cuadrícula queda distorsionada después del procesado e indica como se ha distribuido e la material, sirviendo de ayuda para optimizar el proceso (indica como debe ser el calentamiento en las diversas zonas de la plancha). En la figura siguiente se aprecia que el producto termoconformado tendrá más espesor en la zona donde la lámina toca antes el molde. Por el contrario el menor espesor se dará en las zonas donde la lámina toca más tarde al molde.

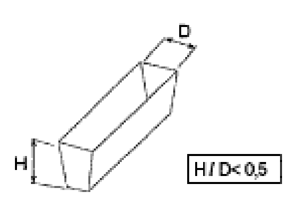




Tipos de moldes

Molde macho

Consiste en dar forma a la lámina de material plástico estirándola sobre las paredes de un macho. Se la llama también conformado en positivo. Si el diseño del molde es complicado y su profundidad es importante, se debe atemperar el molde para evitar un estirado pobre en las zonas de contacto directo molde-lámina así como un excesivo adelgazamiento del espesor en zonas donde no hay contacto directo o éste tiene lugar en la última etapa del conformado.

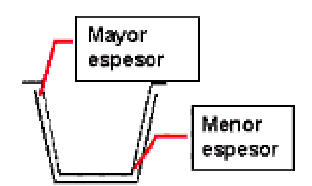


Se pueden presentar problemas de desmoldeo si las paredes del molde no poseen la inclinación suficiente, debido a la contracción del plástico contra el molde. El molde macho posibilita la fabricación de piezas con mayor profundidad que el molde hembra (mayor relación altura / diámetro o H / D).

Molde hembra

También denominado conformado negativo. En este caso el material se conforma sobre una cavidad. El espesor de la lámina disminuye a medida que la profundidad aumenta. El desmoldeo de la pieza es más fácil que en el caso anterior, ya que la propia contracción la facilita. De las dos superficies de la pieza, la superficie exterior es la que debe poseer el mejor acabado y debido a que sobre ella se realiza el contacto con el molde esto obliga a que los moldes tengan un acabado superficial muy bueno.

La construcción de los moldes hembra es más complicada y costosa que la de los moldes macho, no siendo posible además conseguir grandes profundidades de moldeo.



Sistema de generación de fuerza

Presión

Para el termoconformado se puede utilizar aire a una presión que normalmente oscila entre los 1,4 a 5,6 bar aunque se pueden llegar a utilizar presiones de hasta 14 bar. El conformado mediante aire a presión permite temperaturas de trabajo menores que el conformado a vacío, también proporciona un buen copiado de los detalles del molde, pero origina un mayor nivel de tensiones en las piezas moldeadas. Los moldes deben ser más robustos que en el caso de utilizar vacío. Otra característica del empleo de aire a presión es que da lugar a ciclos más cortos debido a la mayor velocidad a que se produce el conformado.

Vacío

Normalmente se opera con una presión de vacío que proporcione un diferencial de presión con la atmósfera de 0,5 a 0,9 bar. Es un sistema que resulta económico y se utiliza principalmente en piezas grandes, aunque también en pequeñas.



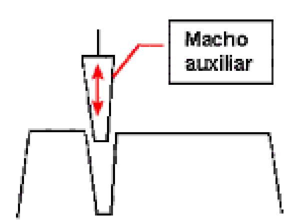
Métodos auxiliares que ayudan al conformado

Preestirado

En ocasiones, la lámina se suele someter a un estirado previo al conformado creándose de este modo una burbuja (que puede ser positiva o negativa) que facilita una distribución más homogénea de espesores. El preestirado es especialmente útil en piezas grandes y complicadas.

Macho auxiliar (assisting plug)

Es un elemento mecánico auxiliar que produce un estiramiento en zonas localizadas de la lámina facilitando el conformado en piezas difíciles.



Métodos de moldeo de una etapa

El termoconformado se realiza en un unico paso, eliminadose el preestirado previo de la lamina.

Básicamente existen cinco tipos:

- Conformado por recubrimiento (drape forming)
- Conformado por vacío (vacuum forming)
- Conformado con presión (pressure forming)
- Forma libre (free blowing)
- Conformado por ajuste completo de moldes (matched-die forming)



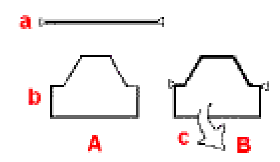


Conformado por recubrimiento (drape forming)

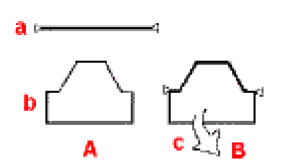
La lámina calentada y sujeta mediante pinzas o mordazas es hecha descender sobre un molde macho o bien éste sube hasta encontrar la lámina, quedando esta última fija. En este método la lámina que primero entra en contacto con el molde no se estira. (en cuanto la lámina entra en contacto con el molde deja de estirarse). Según el molde penetra en la lámina, se va expulsando el aire entre la lámina y el molde. Se puede utilizar bien el vacío o bien presión para producir la fuerza necesaria que obligue a la lámina a adaptarse al molde. Con este método se consiguen piezas con el fondo grueso y las paredes delgadas, siendo el borde superior la parte más delgada.

Conformado por vacío:

A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Lámina conformada sobre un molde hembra.
a) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
b) Molde hembra son agujeros vacíos.
c) Vacío.



Conformado por vacío (vacuum forming)

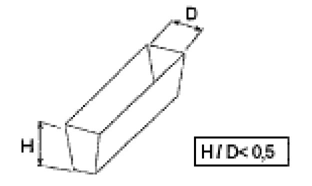


A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Lámina conformada sobre un molde macho.
a) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
b) Molde macho son agujeros vacíos.
c) Vacío.

Conformado por recubrimiento:

En este caso se utiliza un molde hembra. La fuerza que produce el conformado se consigue mediante vacío.

Estas piezas presentan un reborde grueso y presenta el espesor menor en las esquinas del fondo (en teoría , si las esquinas fuesen vivas su espesor sería cero), por eso en esta técnica los radios internos no deben ser muy pequeños y se recomienda que H:D < 0,5, siendo H la profundidad de moldeo y D la menor dimensión de la sección. A este método también se le llama conformado en cavidad.



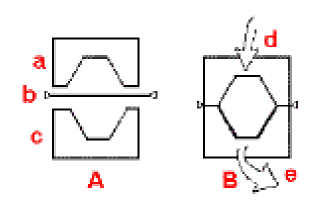


Conformado con presión (pressure forming)

Es muy similar al conformado por vacío salvo que la fuerza de conformado se obtiene con presión en vez de con vacío.

Ya que se va a utilizar presión (hasta 14 bar), es necesario disponer de una caja de presión sobre la superficie libre de la lámina. Esta técnica se suele utilizar con materiales difíciles de transformar, como pueden ser laminas delgadas de PP o para la producción de piezas a partir de plancha gruesa en las que se requiera una gran precisión en la reproducción de detalles.

Conformado con presión:



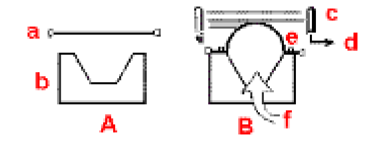
A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Lámina conformada sobre un molde hembra.
a) Caja de presión.
b) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
c) Molde hembra con vacío.
d) Aplicación de la presión del aire.
e) Vacío.

Forma libre (free blowing)

La lámina calentada y enmarcada se somete a un estiramiento con aire a presión para generar de este modo una forma libre al hincharse. La cantidad de presión se controla con una fotocélula que detecta la altura de la burbuja. La burbuja se va enfriando bien sin más o mediante ventiladores. Esta técnica se empezó a utilizar para fabricar cúpulas de ametralladora en aviones de bombardeo, también se utiliza para fabricar claraboyas, carlingas entre otras cosas. Ya que la pieza no toca el molde al no existir este, aquella queda sin marcas de ningún tipo y su calidad óptica (si se produce a la temperatura adecuada y el enfriamiento es adecuado) es muy buena, sin tensiones ni distorsiones. El material más utilizado en este tipo de piezas es acrílico (PMMA) transparente. Excepto en las zonas cercanas al amarre el espesor de las piezas es bastante uniforme. Esta técnica también se suele utilizar para fabricar envases tipo blister.

Forma libre:

A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Lámina de forma libre. La altura de la burbuja se determina mediante una fotocélula.
a) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
b) Caja de presión.
c) Fotocélula.
d) Señal de la presión de aire.
e) Anillas de sujeción.
f) Presión de aire.

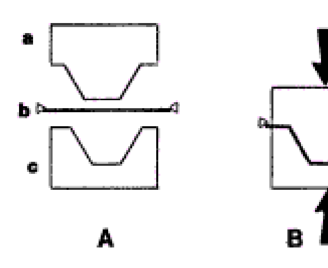




Conformado por ajuste completo de moldes (matched - die forming)

Es un método común de conformado a partir de polímeros relativamente rígidos como por ejemplo la espuma de PS (PS expandido). La lámina calentada y reblandecida se posiciona amarrada entre dos semimoldes que ajustan (macho - hembra). Según el molde se cierra se puede aplicar vacío en la mitad hembra para facilitar el conformado (no es siempre necesario hacerlo). El espesor final de la pieza dependerá de la tolerancia de ajuste entre los dos semimoldes. Se puede originar un movimiento apreciable del material si las fuerzas aplicadas son relativamente grandes. Normalmente las presiones no son mayores de 10 bar y el valor medio suele ser 3,5 bar.

Conformado por ajuste completo de moldes:



A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Lámina conformada por movimiento simultáneo de los dos semimoldes.
a) Semimolde macho.
b) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
c) Semimolde hembra.
d) Aplicación de la fuerza.

Métodos multietapa

En el conformado de lámina delgada, los ciclos son muy cortos y las formas relativamente simples, pudiéndose utilizar de forma satisfactoria los métodos de una sola etapa. En el caso de piezas de espesores gruesos, éstas suelen poseer geometrías más complicadas y profundas, requiriéndose además un espesor uniforme en toda la pieza. Este tipo de piezas son difíciles de conformar adecuadamente mediante métodos monoetapa y se suelen fabricar en procesos denominados multietapa.

La primera etapa consiste siempre alguna forma de estiramiento de la lámina como el que se puede realizar con un macho auxiliar o mediante la creación de una burbuja (billowing). La lámina así preestirada es conformada a continuación contra el molde.

Pasemos a revisar algunos ejemplos multietapa:

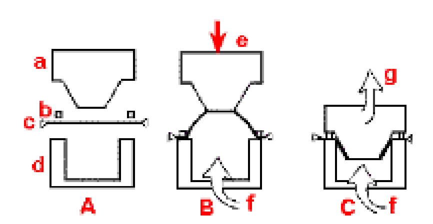
- Conformado por recubrimiento con burbuja (billow drape forming)
- Conformado snap-back y vacío (vacuum snap - back forming)
- Conformado por vacío con burbuja (billow vacuum forming)
- Conformado por vacío por macho (plug assist vacuum forming)
- Conformado por presión asistido por macho (plug assist pressure forming)
- Conformado con inversión de presión asistida por macho (pressure reverse draw with plug assist)
- Conformado con inversión de vacío asistida por macho (vacuum reverse draw with plug assist)



Conformado por recubrimiento con burbuja (billow drape forming)

Consiste en un conformado positivo con estiramiento previo. La lámina se calienta y se amarra, procediéndose a su exterior expansión mediante aire a presión (0,14 a 0,5 bar de presión manométrica). A continuación se inserta un molde macho sobre la lámina, se sangra el aire y se aplica vacío si es necesario. La pieza así obtenida posee un espesor de pared mucho más uniforme que en el caso de recubrimiento simple.

Conformado por recubrimiento con burbuja:

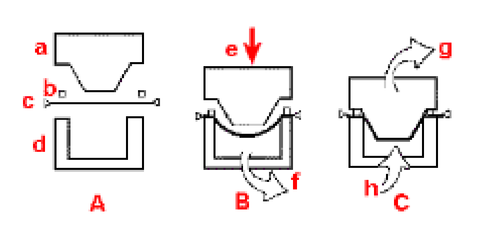


A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: El molde macho se mueve contra la burbuja soplada.
C: Pieza conformada sobre el molde macho por vacío.
a) Molde macho con agujeros de vacío.
b) Anillas de sujeción.
c) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
d) Caja de presión.
e) Movimiento del molde macho.
f) Aplicación de la presión de aire.
g) Vacío.

Conformado snap - back y vacío (vacuum snap - back forming)

En este caso la lámina se preestira formando una burbuja en una caja mediante la aplicación de vacío. El molde a utilizar es un molde macho.

Conformado snap-back y vacío:



A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Movimiento del molde macho hacia la cavidad de la válvula.
C: Aplicación de la presión de aire contra el molde macho.
a) Molde macho con agujeros de vacío.
b) Anillas de sujeción.
c) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
d) Caja de presión.
e) Movimiento del molde macho.
f) Vacío parcial para preestirar la lámina.
g) Vacío.
h) Presión de aire.

Al tocar el macho la burbuja y ser tocada por éste, la parte central (1 / 3 del espesor original) ya no varía y el estirado posterior de la lámina se realiza a costa de las otras zonas que permanecían más gruesas, consiguiéndose así un espesor más uniforme.

Regulando la temperatura de la plancha, la altura de la burbuja, la temperatura y velocidad del macho, el nivel de presión y vacío, es posible controlar ajustadamente el espesor de cualquier sección del artículo conformado.

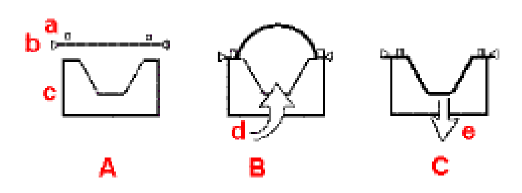
Utilizando macho, en el conformado invertido, las esquinas no son delgadas ya que en ellas se acumula material en el descenso del macho.



Conformado por vacío con burbuja (billow vacuum forming)

Se utiliza para fabricar piezas profundas en moldes hembra. Primero se aplica presión para crear la burbuja y después vacío. Como dato una semiesfera soplada libremente a partir de una lámina caliente tiene un espesor en su parte central de aproximadamente 1 / 3 del espesor original.

Conformado por vacío de burbuja:

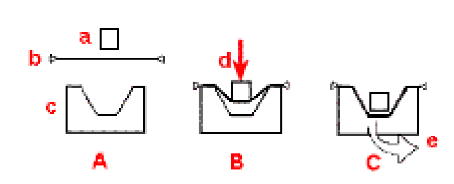


A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Se preestira la lámina con presión de aire.
C: Lámina conformada por vacío en una cavidad hembra.
a) Anillas de sujeción.
b) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
c) Molde hembra con presión.
d) Aplicación de la de presión.
e) Vacío.

Conformado por vacío asistido por macho (plug assist vacuum forming)

Aquí el preestirado se realiza mediante un macho actuado mecánicamente. Primero se preestira la lámina hacia la cavidad y luego se produce el vacío.

Conformado por vacío asistido por macho:



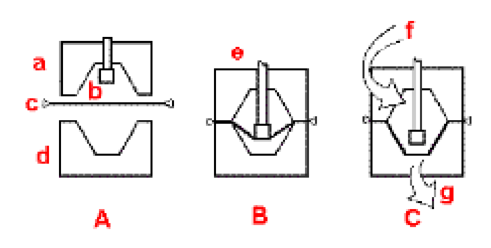
A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Se preestira la lámina con un macho que actúa mecánicamente.
C: Lámina conformada en una cavidad hembra.
a) Macho.
b) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
c) Molde hembra con agujeros de vacío.
d) Movimiento del macho.
e)Vacío.



Conformado por presión asistido por macho (plug assist pressure forming)

En este caso la lámina se termina de conformar con aire a presión soplado a través del macho.

Conformado por presión asistido por macho:



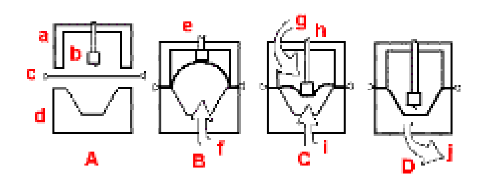
A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Lámina preestirada con avance macánico del macho.
C: Lámina conformada por presión en un molde hembra.
a) Caja de presión.
b) Macho.
c) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
d) Molde hembra con agujeros de ventilación.
e) Movimiento del macho.
f) Aplicación de la presión de aire.
g) Vacío.

Se puede combinar el estirado con burbuja y macho.

Conformado con inversión de presión asistida por macho (pressure reverse draw with plug assist)

La lámina se sopla a presión desde el molde hembra, una vez que se ha estirado es penetrada por el macho que la estira en la cavidad hembra. En este punto se puede aplicar la presión a través del macho para forzar la lámina contra el molde hembra.

Conformado con inversión de presión asistido por macho:



A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Lámina preestirada en la válvula aplicando presión de aire.
C: Se mueve el macho para forzar la lámina contra el molde hembra.
D: Lámina conformada por presión en un molde hembra.

a) Caja de presión.
b) Macho.
c) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
d) Molde hembra con presión de aire.
e) Cuando la onda le toca, el macho comienza a moverse.

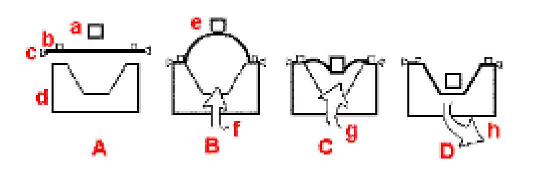
f) Aplicación de la presión de aire.
g) Presión de aire.
h) Movimiento del macho contra la onda.
i) Continúa la presión de aire.
j) Vacío.



Conformado con inversión de vacío asistida por macho (vacuum reverse draw with plug assist)

Como en el caso anterior pero se aplica vacío en vez de presión en la última etapa.

Conformado con inversión de vacío asistido por macho:



A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: Formación de la burbuja.
C: El macho se mueve hacia la onda. La presión de aire continúa.
a) Macho.
b) Anillas de sujeción.
c) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
d) Molde hembra con presión de aire y agujeros de vacío.
e) El mecanismo del macho se activa cuando le toca la burbuja.
f) Aplicación de la presión de aire.
g) La presión de aire continúa mientras avanza el macho.
h) Vacío.

Con este método se pueden conseguir espesores de pared muy uniformes y menores del 25 % del espesor de la plancha primitiva, resultando todos los artículos muy homogéneos en calidad y espesor y generalmente sin mermas aparentes en las propiedades físicas con respecto al material original.

Otras variaciones

Existen otras técnicas, además de las citadas para conformar ciertos tipos de plásticos y productos especiales. Estas son:

- Conformado con lámina fija (trapped sheet forming)
- Conformado deslizante (slip forming)
- Conformado con diafragma (diaphram forming)
- Conformado de dos láminas (twin sheet forming)

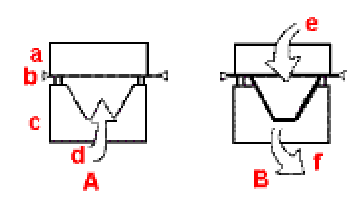




Conformado con lámina fija (trapped sheet forming)

Se utiliza para conformar PS altamente orientado o materiales con gran sensibilidad a la temperatura (PP, PE) de formado. La lámina es mantenida contra una placa porosa caliente hasta que alcanza la temperatura de conformado. Cuando está a la temperatura adecuada se aplica presión a través de la placa porosa o alternativamente vacío a través del molde hembra.

Conformado con lámina fija:

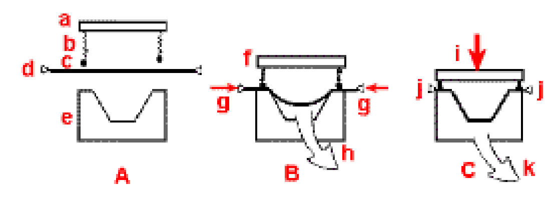


A: La lámina se mantiene contra una placa caliente.
B: Formación de vacío.
a) Placa porosa calentadora.
b) Lámina en una estructura de fijación.
c) Vacío.
d) Presión de aire.
e) Presión de aire a través de la placa porosa.
f) Vacío.

Conformado deslizante (slip forming)

En este caso la lámina no está amarrada firmemente en un principio y tiene aproximadamente la misma área que el artículo terminado (por ejemplo una caja de 10 x 10 x 5 y una lámina de partida de 20 x 20). Según se aplica el vacío la lámina se embute a la vez que desliza por el amarre. En un momento determinado se aumente la fuerza de amarre y se detiene el deslizamiento (esta técnica es muy parecida a la que se utiliza en embutición de metales). Este método está limitado por la resistencia en caliente del plástico y por la probabilidad de que este sea rayado al deslizarse.

Conformado deslizante:



A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: El vacío aplicado estira el exceso de lámina sobre el borde.
C: La placa sujeta detiene el deslizamiento.

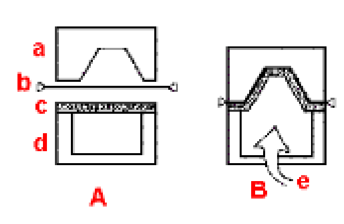
a) Placa sujeta.
b) Muelles.
c) Amortiguadores de baja fricción.
d) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
e) Molde hembra con agujeros vacíos.

f) El mecanismo de sujeción permite que la lámina se deslice.
g) Lámina deslizándose hacia la cavidad del molde hembra.
h) Vacío.
i) La placa sujeta detiene el deslizamiento.
j) La lámina sujeta también detiene el deslizamiento.
k) El vacío continúa.



Conformado con diafragma (diaphram forming)

Para conformar materiales como el PET o PA sin que revienten se utiliza un diafragma caliente y grueso de neopreno que se coloca contra la lámina ya caliente y amarrada. Este diafragma se hincha con aire a presión o con líquido (agua caliente o fluido hidráulico). El diafragma conforma la lámina contra el molde hembra, Se consiguen así espesores de pared muy uniformes y estiramientos relativamente profundos para materiales que no se pueden conformar de otra manera.



Conformado con diafragma:

A: Lámina precalentada antes del conformado.
B: El diafragma conforma la lámina contra el molde hembra.
a) Molde macho con agujeros de ventilación.
b) Lámina precalentada y sujeta mediante pinzas.
c) Diafragma caliente y grueso de neopreno.
d) Caja de presión.
e) Aplicación de la presión de aire.



Conformado de dos láminas (twin sheet forming)

Veremos dos variantes:

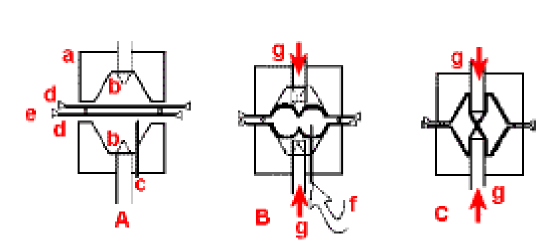
- Fabricación de cuerpos huecos.
- Fabricación de piezas multicapas.

Fabricación de cuerpos huecos:

Partiendo de dos láminas gruesas previamente cortadas se procede a su calentamiento manteniéndolas separadas. Cuando se encuentran a la temperatura adecuada se llevan dentro de un molde hembra. Se introduce una aguja entre las láminas y una vez que se produce el cierre del molde se introduce aire a presión por la aguja, inflándose así las láminas contra las cavidades.

Este método produce piezas huecas relativamente planas que se pueden rellenar por ejemplo de espuma PUR para proporcionar rigidez adicional. En el caso de piezas grandes de gran espesor este método compite con la tecnología de moldeo por soplado, otros productos son palets, depósitos, tablas de surf.

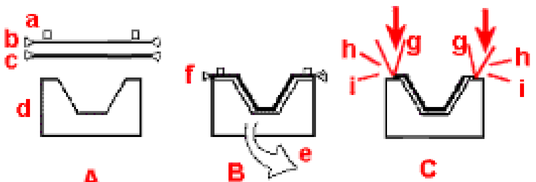
Conformado de dos láminas. Fabricación de cuerpos huecos:



A: Láminas precalentadas antes del conformado.
B: Se calientan las láminas. Se introduce una aguja aplicando aire a presión por ésta.
C: Se forman las arcas.
a) Molde hembra con agujeros de ventilación.
b) Tapón.
c) Soplete (aguja de soplado).
d) Lámina precalentada, sujetada con pinzas.
e) Separador de láminas.
f) Se introduce aire a presión por la aguja.
g) Las láminas se mueven mecánicamente hasta formar el arco.

Fabricación de piezas multicapas:

Se utiliza para generar envases de dos capas, generalmente de materiales incompatibles, que si se conformasen a partir de lámina coextruida no permitirían el reciclaje de las mermas. Una de las capas actúa generalmente a manera de barrera contra el oxigeno (PP, PA, PET). En esta técnica el material viene en bobinas y los dos materiales se calientan de forma independiente. Una vez caliente el material se lleva a la zona del molde donde se conforman de manera conjunta una sobre otra, recortándose el sobrante in situ. El material sobrante puede ser separado fácilmente en sus dos componentes originales. El propio producto se puede delaminar si se quiere, ya que la adhesión originada es débil.



Conformado de dos láminas. Fabricación de piezas multicapas:

A: Láminas precalentadas separadas antes del conformado.
B: Vacío que se forma en el molde hembra.
C: El material sobrante se recorta in-situ y se separa fácilmente.

a) Anillas de sujeción.
b) Láminas del material A precalentadas y sujetas con pinzas.
c) Láminas del material B precalentadas y sujetas con pinzas.
d) Molde hembra con agujeros de ventilación.

e) Vacío aplicado.
f) Sujeto en el lugar.
g) El material se recorta in-situ.
h) Trozo recortado del material A.
i) Trozo recortado del material B.

Existen más técnicas (sobre todo con preestiraje mediante burbuja y macho) y no se tratan aquí la totalidad de las mismas ya que hay muchísimas variantes (ver bibliografía).



Conformado de dos láminas (twin sheet forming)

Veremos dos variantes:

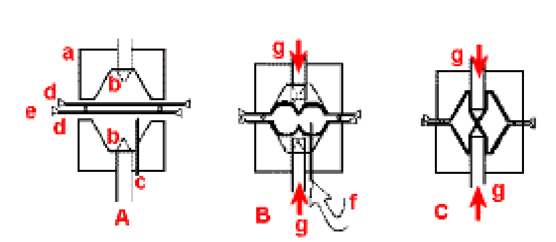
- Fabricación de cuerpos huecos.
- Fabricación de piezas multicapas.

Fabricación de cuerpos huecos:

Partiendo de dos láminas gruesas previamente cortadas se procede a su calentamiento manteniéndolas separadas. Cuando se encuentran a la temperatura adecuada se llevan dentro de un molde hembra. Se introduce una aguja entre las láminas y una vez que se produce el cierre del molde se introduce aire a presión por la aguja, inflándose así las láminas contra las cavidades.

Este método produce piezas huecas relativamente planas que se pueden rellenar por ejemplo de espuma PUR para proporcionar rigidez adicional. En el caso de piezas grandes de gran espesor este método compite con la tecnología de moldeo por soplado, otros productos son palets, depósitos, tablas de surf.

Conformado de dos láminas. Fabricación de cuerpos huecos:



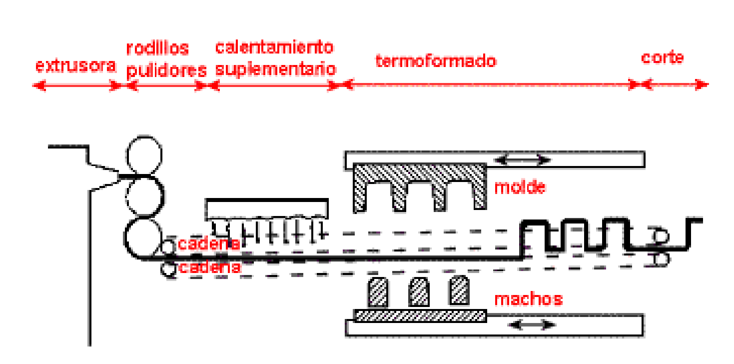
A: Láminas precalentadas antes del conformado.
B: Se calientan las láminas. Se introduce una aguja aplicando aire a presión por ésta.
C: Se forman las arcas.
a) Molde hembra con agujeros de ventilación.
b) Tapón.
c) Soplete (aguja de soplado).
d) Lámina precalentada, sujetada con pinzas.
e) Separador de láminas.
f) Se introduce aire a presión por la aguja.
g) Las láminas se mueven mecánicamente hasta formar el arco.

Fabricación de piezas multicapas:

Se utiliza para generar envases de dos capas, generalmente de materiales incompatibles, que si se conformasen a partir de lámina coextruida no permitirían el reciclaje de las mermas. Una de las capas actúa generalmente a manera de barrera contra el oxigeno (PP, PA, PET). En esta técnica el material viene en bobinas y los dos materiales se calientan de forma independiente. Una vez caliente el material se lleva a la zona del molde donde se conforman de manera conjunta una sobre otra, recortándose el sobrante in situ. El material sobrante puede ser separado fácilmente en sus dos componentes originales. El propio producto se puede delaminar si se quiere, ya que la adhesión originada es débil.



Termoconformado en línea directa con la extrusión o coextrusión. Supone un ahorro energético en el calentamiento del 30 al 40 %. Proporciona una distribución de temperaturas más uniforme. Ocupa menos espacio (un 50 % menos) que si se tuviesen los dos sistemas por separado. Es más complicado de operar debido a la necesidad de un perfecto sincronismo (problemas en las paradas).



El de rollos se dedica fundamentalmente al procesado de lámina delgada y embalaje. En el caso de rollos se pueden recortar las mermas bien en el mismo molde o bien en una estación aparte. En el rotativo a veces suele haber 4 estaciones siendo la cuarta para el recortado. Cuando se trabaja con láminas gruesas siempre se suelen recortar aparte (se suelen usar troqueles, sierras, etc.).



Calentamiento del material

Existen 3 procedimientos básicos para calentar la lámina:

- Por contacto o conducción
- Por convección forzada en estufas de aire caliente
- Por radiación infrarroja

Calentamiento por contacto o conducción

En este caso una placa calefactora se coloca en contacto con la lámina y la calienta por conducción. Se utiliza en un caso muy concreto que ya hemos visto, el de lámina fija.

Calentamiento por convección

En este caso el material es introducido dentro de una estufa donde circula una corriente de aire caliente. Es un método lento y térmicamente poco eficiente. Se utiliza sobre todo para calentar planchas gruesas. La temperatura del aire en la estufa suele estar entre los 150 y 180 ºC.

Calentamiento por radiación infrarroja

Es el método más ampliamente utilizado. Permite un ajuste localizado de la distribución de temperaturas, proporciona un calentamiento rápido, un buen control de temperatura. Se utiliza para láminas finas y gruesas. La temperatura de las placas radiantes suele oscilar entre 500 y 800 ºC).

***nota** ¿qué se entiende por grueso a efectos de calentamiento?

A la hora de elegir un método u otro de calentamiento hay que tener en cuenta el número de Biot (Bi) que es un número adimensional que representa el cociente entre la energía recibida por la superficie y la conducida al interior de la lámina.

$$Bi = \frac{h \cdot t}{k}$$

donde:

Se considera una lámina de espesor 2t calentada por ambas caras
t = semiespesor de la lámina
h = coeficiente de convección
k = conductividad térmica del polímero

Si Bi < 0,1 la lámina se considera delgada a efectos de calentamiento y es por tanto buena candidata a ser calentada por infrarrojos. Si Bi > 1 la lámina se considera gruesa o pesada a efectos térmicos.

La lámina debe alcanzar una temperatura uniforme en todo su espesor sin llegar a alcanzar valores excesivos en su superficie. El calentamiento por infrarrojos puede producir este fenómeno de calentamiento excesivo de la superficie si la lámina es gruesa y su conductividad baja (valores de Bi altos), sin embargo en una estufa donde el calentamiento se realiza por convección esto no ocurre, se consigue una temperatura más uniforme en todo el espesor pero tarda más en alcanzarse.



Fluido	h (x 10^{-3} W / cm^2·s·C)	[Btu / ft^2·h·F]
Aire en reposo	0,5 - 1	0,8 - 2
Aire que se mueve mediante ventiladores	1 - 3	2 - 5
Aire que se mueve mediante sopletes	3 - 10	5 - 20
Vapor de agua y aire	30 - 60	50 - 100
Aspecto nuboso	30 - 60	50 - 100
Agua pulverizada	30 - 90	50 - 150
Aceite en tuberías	30 - 180	50 - 300
Agua en tuberías	60 - 600	100 - 1.000
Vapor de agua en tuberías, condensación	600 - 3.000	1.000 - 15.000

En el calentamiento por convección, al ser un método poco eficiente se aporta calor a la superficie a un ritmo lento, esto lo hace idóneo para calentar láminas gruesas ya que no degradan la superficie. El tiempo de calentamiento es proporcional al cuadrado del espesor.

En el calentamiento por radiación el calor se aporta rápidamente y de forma muy eficiente y si el espesor es grande y la conductividad mala se puede quemar la superficie de la lámina antes de haber conseguido llevar al núcleo a la temperatura deseada. Aquí el tiempo de calentamiento es proporcional al espesor.

Idealmente la fuente radiante debe emitir energía a una longitud de onda que coincida con los picos en el espectro de absorción infrarroja del polímero en cuestión.

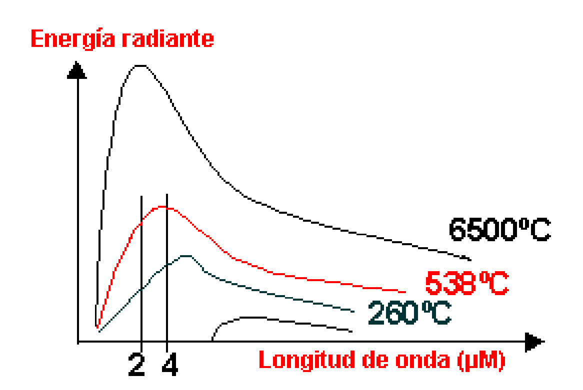
Ejemplo:

> Para PS esta longitud de onda es de 3,2 a 3,7 µm, lo cual implica que la temperatura de la fuente radiante debe estar entre 510 a 630 ºC que es la temperatura correspondiente a esa longitud de onda.

Dependiendo de la naturaleza del plástico se habrá de buscar la temperatura de la fuente radiante que proporcione mayor rendimiento energético (calentamiento más rápido).

La zona interesante es la correspondiente al intervalo de 2 a 4 µm, que corresponde a la zona donde se presentan la mayoría de los picos del espectro de absorción de infrarroja de la mayor parte de los plásticos.

En la siguiente gráfica se ve que cuanto menor es la temperatura a la que irradia la fuente mayor es el valor de la longitud de onda a la cual se irradia la máxima energía.





Moldes



Los moldes para termoconformado suelen ser baratos comparados con los de inyección.

Para la fabricación de prototipos se suelen usar madera (buena dureza y terminación), yeso (fácil de fabricar), resina epoxi (buena reproducción, fácil de fabricar). Todos estos materiales tienen el inconveniente de calentarse en exceso al ser malos conductores térmicos, invalidándolos para grandes series o ciclos cortos.

Los moldes para producción se suelen fabricar de aluminio colado o mecanizado, manganeso, acero. Estos moldes van dotados además de conductos de refrigeración. Es importante también su diseño teniendo en cuenta diversas consideraciones:

- Enfriamiento
- Otras consideraciones en el diseño de moldes

Enfriamiento

Para obtener un buen conformado en grandes series de piezas en procesos continuos, los moldes deben permanecer a una temperatura constante inferior a la temperatura de deformación del plástico (aspecto ya comentado anteriormente). Para lograr esto se requiere un balance térmico entre el calor aportado al molde por el plástico mientras se enfría y el calor evacuado del molde durante el proceso de conformado. Si no se consiguiese este balance energético al refrigerar el molde éste se iría calentando progresivamente hasta alcanzar una temperatura demasiado alta para permitir el desmoldeo. Para refrigerar el molde existen varios métodos:

- Enfriamiento directo: consiste en unos canales interiores al molde por los cuales circula un fluido (aceite o agua).
- Enfriamiento indirecto: mediante unos ventiladores de aire forzado.
- Combinación de los dos anteriores.
- Agua fría pulverizada en forma de spray o neblina: se suele utilizar para acortar el proceso aun más.


Ventilador

Normalmente para grandes producciones se utilizan moldes de aluminio colado con canales fabricados a partir de tubos de cobre o acero inoxidable, colocados cerca de la superficie (a unos 20 mm) del molde y distribuidos por toda la pieza, pudiendo tener (si la pieza es de gran tamaño) dos circuitos. El enfriamiento se produce por un lado cediendo el calor del molde al agua y por otro lado al medio(aire, aire agitado, agua pulverizada).

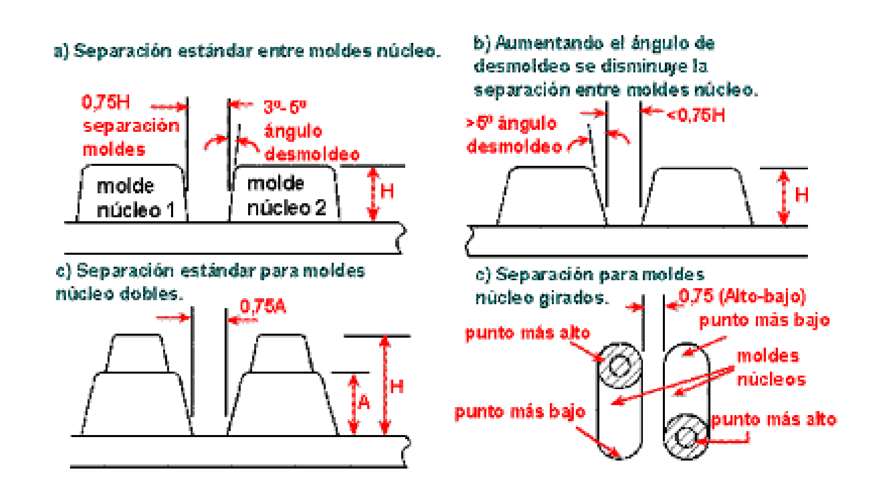
Otras consideraciones en el diseño de moldes

Con el objeto de facilitar el desmoldeo, las paredes deberán presentar cierta inclinación. En el caso de moldes machos una inclinación una inclinación de 2 - 3º en todas las paredes verticales asegura una cómoda extracción de la pieza después del despegue de la misma que se consigue corrientemente aplicando una pequeña presión de aire. En moldes hembra es suficiente 0,5 º en cada pared, ya que la contracción proporciona una holgura adicional que ayuda a la retirada del artículo.

Los radios en los bordes y esquinas de las piezas son recomendables ya que minimizan las concentraciones de tensiones. Se recomienda como mínimo radios iguales al espesor de la lámina.

La contracción es otro aspecto a tener en cuenta. Como ya sabemos los materiales contraen al disminuir la temperatura. Según esto habrá que dejar un sobrematerial (machos) o comer más la cavidad (hembra) para compensar la disminución de dimensiones. En los moldes hembra la contracción es un 25 % mayor que en los moldes macho ya que en estos la pieza se empieza a contraer primero ya antes del desmoldeo al no existir restricciones de forma, contrayéndose además durante el desmoldeo y postmoldeo.

Plástico	Contracción (%)
LDPE	1,6 - 3,0
HDPE	3,0 - 3,5
ABS	0,3 - 0,8
PMMA	0,2 - 0,8
SAN	0,5 - 0,6
PC	0,5 - 0,8
PS	0,3 - 0,5
PP	1,5 - 2,2
PVC rígido	0,4 - 0,5
PVC flexible	0,8 - 2,5



El diseño del macho auxiliar es también un factor de suma importancia (la forma de su punta), pero también lo es su temperatura de trabajo. Ambos factores influirán de manera decisiva en la distribución final de los espesores en la pieza.

El molde va agujereado o taladrado para poder conseguir un diferencial de presión que facilite el conformado. A la hora de materializar estos agujeros deben evitarse que tengan forma de ranura o que sean cuadrados, siendo recomendables agujeros redondos cuyo diámetro no sea mayor de 0,7 mm para evitar que queden marcados en la pieza. Los agujeros deben posicionarse en forma y número de modo que se produzca una rápida y eficiente evacuación del aire entre molde y pieza. Su posicionamiento viene dado por la lógica y la experiencia, como regla general los agujeros se colocan en las zonas donde el contacto entre molde y pieza se produce más tarde.

Para determinar el diámetro de los agujeros sin que estos marquen la pieza se puede aplicar la siguiente fórmula:



$$y = \alpha \cdot t$$

con:

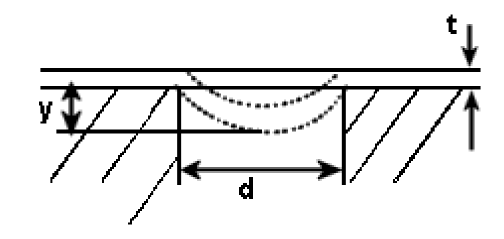
$$\alpha = 0.516 \cdot \left(\frac{q}{E}\right) \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^4$$

(Esta es la fórmula de flexión de una placa plana circular)

siendo:

d = diámetro del agujero
t = espesor local de la lámina
y = flecha máxima
q = presión aplicada
E = módulo a la temperatura de deformación

Además se supone que el coeficiente de Poisson es n = 0,5.



Ejemplo:

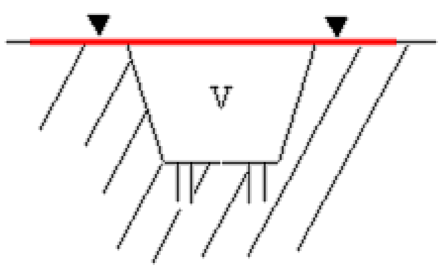
E = 10 MPa; q = 0,1 Mpa; t = 0,2 mm; d = 0,75 mm

$$\alpha = 0.516 \cdot \frac{0.1}{10} \cdot \left(\frac{0.75}{0.2}\right)^4 = 1.02$$

y = 1,02 * 0,2 = 0,204

El valor máximo aceptable de la flecha y viene generalmente predeterminado por el cliente. Hay que tener en cuenta que t es el espesor local y no el que tiene la lámina inicialmente. Al aumentar la temperatura la flecha y aumenta ya que el módulo disminuye.

Para determinar el número de agujeros se debe proceder de la siguiente manera: Si se calcula el volumen de aire V encerrado inicialmente entre la lámina y el molde y sabiendo que el aire debe ser evacuado en un lapso de tiempo θ (razonablemente corto), se puede calcular el número de agujeros necesarios si se conoce su diámetro. El número de agujeros debe ser tal que el caudal de aire evacuado sea mayor o igual que V / θ. Por lo tanto:



Sección de los agujeros x velocidad del aire $\geq$ V / θ 110

La velocidad del aire es C = 340 m / s si el cociente presión externa/presión interna es mayor de 0,52. Además se introduce un coeficiente de seguridad para tener en cuenta la limitada velocidad de estiramiento de la lámina frente a la del aire. Por tanto la fórmula anterior queda:

$$C \cdot N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \beta \cdot \frac{V}{\theta}$$

siendo:



N = número de agujeros
C = 340 m / s
β es el coeficiente de seguridad, siempre debe ser mayor que 1.
Un valor adecuado es β = 10. Si la lámina está preestirada el valor a tomar será menor.

Despejando N:

$$N = \frac{4 \cdot \beta \cdot V}{\theta \cdot C \cdot \pi \cdot d^2}$$

Ejemplo:

V = 1000 cc, θ = 0,1 s; d = 1,59; β = 10. Aplicando la fórmula N = 150 agujeros.

Como se ha comentado anteriormente, los agujeros se colocan en las regiones donde ocurre el último estiramiento, así como en áreas planas más o menos amplias. Deben evitarse problemas de atrapamientos de aire debido a una mala colocación de los agujeros. Los moldistas experimentados evitan poner un número demasiado pequeño de agujeros de diámetro demasiado grande. Los diámetros grandes obligan a trabajar con temperaturas bajas para no marcar la pieza, pudiendo provocar una reproducción pobre de los detalles.

En relación a las contrasalidas, es posible moldear piezas con contrasalidas utilizando moldes partidos.



Relación de formado

Existen varios ratios que definen el conformado. Todos ellos son artificiales ya que no tienen en cuenta ni las variaciones locales de espesor ni otro tipo de efectos, aun así se utilizan con bastante frecuencia.

Relación de áreas

Si se supone que durante el estiramiento el volumen del plástico permanece constante, entonces

Siendo A_O el área inicial de la lámina, t_O el espesor inicial de la lámina, t_A el espesor medio de la pieza y A el área final de la pieza.

La relación de áreas será: $R_A = A / A_O = t_O / t_A$

$R_A < 3{,}5$ formado fácil

R_A entre 3,5 y 4, formado normal

$R_A > 4$ formado difícil

Relación profundidad diámetro

Salvo en el caso de formas simples es difícil de definirlo sin ambigüedad.

Se define como H / D = Altura o profundidad / diámetro o ancho.

En el caso de cavidades rectangulares el denominador es la longitud diagonal..

H:D < 1, formado fácil

H:D entre 1 y 1,4 formado normal

H:D > 1,4, formado difícil

Como ya se ha comentado estos ratios son artificiales y no tienen en cuenta los cambios de espesor locales, que son importantes sobre todo en las esquinas.

Los sistemas de vacío requieren que la presión diferencial no baje y se mantenga estable durante todo el ciclo de conformado. Para ello deben existir unos depósitos en los cuales la bomba genere el vacío. Estos depósitos deben tener una capacidad adecuada al aire a extraer durante el proceso de conformado. Para una regulación precisa, es necesario un tanque de vacío. Además, en ciclos largos, el uso de un tanque permite utilizar bombas de vacío menores.

Supongamos que:

Si se supone que durante el estiramiento el volumen del plástico permanece constante, entonces

V_O = volumen del tanque vacío + tuberías hasta la válvula de control de vacío.

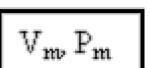
P_O = presión absoluta en el tanque de vacío.

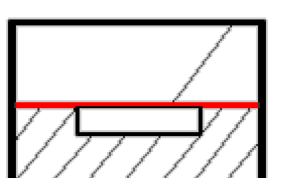
V_m = volumen de aire en el molde.

P_m = presión inicial en el molde (a nivel del mar sería 1 atm, si no hay preestiraje con presión, en cuyo caso sería aprox. 3 bar).

P_1 = presión de trabajo deseada.

V_0, P_0 …..mediante el uso de la bomba se consigue en el tanque un volumen V_O a una presión P_O (menor que la presión atmosférica)…





…..Al abrir la válvula del tanque se equilibran las presiones hasta alcanzarse la de trabajo P_1. En el molde se produce una expansión (la presión disminuye de P_m a P_1) y en el tanque se produce una compresión (la presión aumenta de P_O a P_1).

El trabajo (despreciando rozamientos) es :

$(P_m - P_1)\ V_m = (\ P_1 - P_O)\ V_O$

Despejando V_O se podría calcular el volumen necesario del tanque de vacío para conformar una determinada pieza.

Ejemplo:

V_m =108.000 cc, P_m =1 bar, P_O = 0,03 bar, P_1 = 0,16 bar.
Despejando V_O se obtiene que el tanque de vacío debería poseer una capacidad de 720.000 cc.



Reglas generales en el termoconformado

A continuación se exponen una serie de reglas aproximadas, aunque no siempre un proceso que no las siga tiene por que dar lugar a piezas malas.

- La mayoría de los plásticos se conforman a temperaturas de 100 a 175 ºC.

- Las láminas de más de 1 cm de espesor se calientan mejor en hornos de convección de aire caliente.

- La distancia entre los elementos calefactores debe ser menor que la distancia entre el plano del elemento y la lámina.

- En el conformado mediante vacío el volumen del tanque de vacío debe ser de 6 a 20 veces el de la cavidad libre del molde.

- En el formado por vacío, el vacío nunca debe bajar de 500 mm de Hg, siendo lo normal 710 a 725 mm de Hg.

- Cuanto más rápido se aplica el vacío, mejor se produce el estirado (hasta cierto punto). Una velocidad de estirado excesiva puede producir arrugas (bridging, webbing).

- Cuando se realiza vacío lento, se requieren moldes calientes para conseguir buenos duplicados de los mismos.

- Cuanto más caliente esté el molde mayor será la contracción final.

- Si se utiliza gran cantidad de aire para preestirar la lámina, debe precalentarse a 5 - 10 ºC de la temperatura de la lámina para minimizar un enfriamiento prematuro de la misma. Si el volumen de aire utilizado es pequeño no hay por que precalentarlo.

- La temperatura de los machos auxiliares, si son metálicos, debe estar a 10 - 20 ºC de la temperatura de la lámina para minimizar marcas de enfriamiento en la pieza. Los machos de madera o resina no necesitan calentarse debido a su peor conductividad.

- Los machos que posean un buen deslizamiento superficial reducen la necesidad de establecer un control de temperaturas de los mismos tan exacto.

- Si se conforma una pieza para una aplicación óptica, la lámina caliente no debería tocar una superficie fría durante el conformado.

- El conformado a presión es más económico para tiradas de 5.000 a 20.000 piezas.

- El conformado a presión compite con el moldeo por inyección a un 10 - 20 % del coste del molde y a un 25 - 50 % del tiempo de lanzamiento.

- Aunque en el conformado a presión se pueden usar presiones de hasta 3.4 MPa., lo normal es usar presiones de 0,34 - 0,68 MPa.

- Una profundidad de preestirado típica es igual a la mitad de la dimensión más estrecha de la lámina sin deformar (ejemplo, para un rectángulo de 100 x 500, la profundidad de preestirado sería 50).

- En el conformado invertido, una altura óptima de burbuja es 2 / 3 de H:D.

- El conformado invertido debe actuar cuando la punta de la burbuja es detectada por una fotocélula.



- El conformado por ajuste total de moldes se usa cuando la lámina es muy rígida a la temperatura de formado (PS espumado, CPET, HDPE; PP; materiales de fibra corta o carga mineral).

- En el conformado por ajuste total las presiones de cierre oscilan entre 0,34 y 0,68 MPa.

- El conformado por ajuste total se utiliza si es necesario reproducir detalles en ambas caras o si hay cambios bruscos de espesor.

- Los moldes hembra dan lugar a bordes gruesos y fondos delgados.

- Los moldes macho son más baratos de fabricar pero requieren ángulos de desmoldeo mayores.

- Los ángulos de desmoldeo típicos son: machos 2 - 8º siendo la media 4 - 6º, hembras 0,5 - 5º siendo la media 1 - 2º.

- El 50 - 75 % de la contracción ocurre antes de que la temperatura de la pieza haya caído a su temperatura de distorsión.

- Los valores típicos de contracción son aproximadamente 0,5 % en machos y 1 % en hembras.

- Para que los detalles del texturizado sean precisos, su profundidad deberá ser mayor que el espesor local de la lámina.

- Los ángulos de desmoldeo deben aumentarse si existe texturizado. Por cada 0,005 mm de profundidad del texturizado se debe dar 1º de ángulo de desmoldeo.

- El diámetro de los agujeros de vacío debe ser menor que el espesor local de la lámina para prevenir su marcado.

- Las marcas de enfriamiento son una indicación de un cambio rápido de espesor local. También se pueden deber a un molde frío o a un vacío lento.

- La medida hasta la cual una lámina de plástico puede ser estirada es función de su resistencia en caliente. Generalmente $R_A < 5$ y H:D < 1.

- Cuando se estiran plásticos sensibles a la entalla (PA, PS, PC) en zonas de aristas vivas o agudas, las piezas pueden fallar durante su uso o durante el desmoldeo.

- Las piezas que posean ángulos menores de 90º pueden presentar sensibilidad a la entalla independientemente del tipo de material.

- La utilización de filtros polarizados ayuda a detectar zonas de piezas altamente estresadas en PS, PC y PMMA transparentes.



Tipo de lámina	Aplicaciones
1. Extruida o coextruida	Vasos y platos desechables, Envases de alimentos, Envases de detergentes, Otros envases, Bandejas, Contrapuertas de neveras y congeladores, Tanques de neveras, Cajones, Paneles de automóvil, Carcasas de equipos, Cascos de botes pequeños, Bañeras, piletas de ducha, Fregaderos, lavabos, Paneles de cabinas.
2. Espumada	Bandejas para carne, Cajas de huevos, Cajas de hamburguesas, Recipientes para comida, Platos desechables.
3. Biorientada	Cunas de galletitas, Envases de alimentos, Envases decorativos (cajas de flores), Cubiertas protectoras.

Ventajas y limitaciones del termoconformado

Ventajas:

- Moderado coste de equipos y moldes.
- Permite fabricar piezas de gran tamaño.
- Es posible obtener espesores de pared muy pequeños.
- Alto nivel de producción.

Inconvenientes:

- En general, las piezas deben ser troqueladas o recortadas.
- Se produce un elevado porcentaje de desperdicio (mermas) aunque puede ser reciclado tras ser molido.
- No reproduce de manera exacta todos los detalles del molde.
- No es posible obtener cambios abruptos en el espesor de la pieza.
- Es necesario partir de una materia prima semielaborada.